

MAG. ANDREAS BREUSS MSC.

1150 Wien, Künstlergasse 11. Loft 0G2.

+43 699 11 83 81 44

ab@andibreuss.at, www.andibreuss.at

An das
Amt der NÖ Landesregierung
Abteilung F2 Wohnungsförderung/ Wohnbauforschung
Landhausplatz 1
3109 St. Pölten

NIEDERÖSTERREICHISCHE
W O H N B A U
F O R S C H U N G

Impulsprogramm

für mehr Wohnqualität

ENDBERICHT

Endbericht von Mag. Andreas Breuss MSc;

Projekttitlel

Massive Leimbauweise im verdichteten Flachbau unter Berücksichtigung der regionalen Wertschöpfung.

Projektwerber

ARGE Architekten ZT Dipl. Arch Neil Harkess und Mag. Andreas Breuss MSc.

Künstlertgasse 11. Loft OG 2. (Neue Adresse)

1150 Wien

Projektcode

W6012

1. Förderungswerber

ARGE Architekten ZT Dipl. Arch. Neil Harkess und Mag. Andreas Breuss. MSc.

Künstlertgasse 11. Loft OG 2. (Neue Adresse)

1150 Wien

Tel. 0699 11 83 81 44

1.1 Projektleiter

Mag. Andreas Breuss. MSc.

Künstlertgasse 11. Loft OG 2. (Neue Adresse)

1150 Wien

0043 699 11 83 81 44

ab@andibreuss.at

1.3 Bankverbindung und Kontonummer

Bank Austria.

IBAN AT68 12000 22722518900

BIC BKAUATWW

Inhaltsverzeichnis

1. Projektantrag (gekürzt)	3
2. Vergleich der Lehmbausysteme	4
2.1. Stampflehmbau	4
2.2. Hypokaustenlehm-mauerwerk	6
2.3. Lehm-mauer mit einer tragenden Holzstruktur	9
3. Stand der Forschung zum Holz-Lehm-bau	11
4. Vergleich Holzleichtbau und Massivbau	14
5. Bauphysikalische Eigenschaften von Holz und Lehm	17
5.1. Feuchteschutz	17
5.2. Wärmeschutz	19
5.3. Brandschutz	20
5.4. Schallschutz	21
5.5. Dichtigkeit	21
5.6. Abschirmung gegen Strahlung	23
6. Holz-Lehm-Verbundsystem	24
6.1. Grundsatz	24
6.2. Statisch wirksame Beplankung und Luftdichtigkeit	24
6.3. Holzkonstruktion	26
6.4. Materialien im Schichtaufbau	27
6.5. Aufbau des Holz-Lehm-Verbundsystems	28
6.6. Dimension und Aufbau des Holz-Lehm-Verbundsystems	37
6.7. Das Holz-Lehm-Verbundsystem	37
7. Holz-Lehm-Verbund-Musterelement	53
7.1. Herstellungsverfahren	53
7.2. Bilddokumentation	53
8. Optimierung des Holz-Lehm-Verbundsystems	61
9. Prototypische Anwendung des Holz-Lehm-Verbundsystems für ein Reihenhaus	64
9.1. Beschreibung des Reihenhausentwurfes	64
9.2. Grundmodulbeschreibung für den Reihenhauskomplex	66

9.3. Das Grundmodul	67
9.4. Montage	69
9.5. Fussbodenaufbau	70
9.6. Geschossdecke	71

Abstract [folgt noch]

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

Anhang [folgt noch]

Planunterlagen M 1:100, 1:50

Detailpläne M 1:10

Bauphysikalische Berechnung zum Wärmeschutz

Bauphysikalische Berechnung zur speicherwirksamen Masse

Statisches Gutachten

1. PROJEKTANTRAG (gekürzt)

Bis Ende des 19. Jahrhunderts war der massive Lehmbau eine sehr verbreitete Bauweise im Weinviertel. Lehm wurde direkt am Baugrund oder in benachbarten Lehmgruben gewonnen. Häufig haben Gemeinden Lehmgruben zur kostenlosen Entnahme von Baulehm zur Verfügung gestellt.

Nach den beiden Weltkriegen kam es kurzzeitig zu einem Anstieg an Lehmbauten, der durch einen Mangel an anderen verfügbaren Materialien erklärt werden kann.

Danach ist der Lehmbau in Vergessenheit geraten, und künstlich hergestellte Baumaterialien haben sich durchgesetzt.

Dabei ist Lehm bei richtiger Anwendung ein ausgesprochen hochwertiger Baustoff, der gesundes und qualitätsvolles Wohnen garantiert.

Neue Lehmbautechnologien könnten in Regionen mit einer schwachen Wirtschaftsleistung neue Impulse setzen.

Neben dem Errichten von Lehmbauten bieten Lehmabbau, Herstellung von Lehmbauprodukten, Standardisierung von Lehmbaumaterialien sowie Halbprodukten interessante Möglichkeiten, nachhaltige Arbeitsplätze schaffen zu können.

Das langfristige Ziel sind Gebäude in Lehm- oder Mischbauweise, bei denen das Baumaterial aus der Region stammt, und die Wertschöpfung lokal genutzt, und nicht von überregionalen Konzernen abgeschöpft wird.

Der massive Lehmbau ist eine alte Technologie, die im Weinviertel über viele Jahrhunderte abgewendet wurde. Ziel ist, diese Tradition und das Wissen um diesen Baustoff zu nutzen und eine zeitgemäße Art des Bauens mit Lehm weiter zu entwickeln, die den Nutzern eine sehr hohe Wohnqualität bieten kann.

Diese neu zu entwickelnde Form des Lehmbaus soll auf Augenhöhe mit der konventionellen Bauweise sein. Das heißt sie entspricht den heute gültigen Rechts- und Baunormen, und sie kann mit anderen Bauweisen wie zum Beispiel dem massiven Ziegel- oder Holzbau technisch und wirtschaftlich konkurrieren.

Anlass dieser Studie ist die Erforschung von drei konstruktiven Systemen für einen zeitgemäßen Lehmbau.

Stampflehm

Massive Hypokaustenlehm

Lehm mit einer tragenden Holzstruktur

Ziel ist eine Gegenüberstellung der drei oben genannten Konstruktionssysteme, die alle als standardisierte Bausysteme am Markt noch nicht vorhanden sind. Haben diese Bauweisen Chancen mit den heutigen Bautechnikanforderungen Anwendungen zu finden?

Die Forschungsstudie bietet im ersten Schritt Grundlagen um eine standardisierte und leistbare Bauweise mit Lehm zu entwickeln, bei der für Herstellung und Ausführung regional spezialisierte Firmen und Industrien genutzt und/oder neu gegründet werden.

In einem weiteren Schritt sollten dann Materialversuche und -untersuchungen, statische und bauphysikalische Berechnungen und Tests vorgenommen werden, um eine Zertifizierung der verwendeten Baustoffe bzw. des Konstruktionssystems zu erreichen.

In einem dritten Schritt sollte parallel dazu eine Evaluierung stattfinden, wo sich neue regionale Lehmindustrien ansiedeln können, und wo gewachsene – zum Teil historische – Lehmabbaustätten genutzt oder reaktiviert werden können.

Der letzte Schritt ist dann der **Bau eines Musterhauses**, unter Anwendung des neu entwickelten Bausystems. Dieses Musterhaus soll einerseits mit erforderlichen Messstationen versehen werden, um ein genaues Monitoring zu verfolgen, aber andererseits vor allem für interessierte und neugierige Nutzer erfahrbar werden.

2. VERGLEICH DER LEHMBAUSYSTEME.

2.1. STAMPFLEHMBAU.



Abbildung 01: Stampflehmhaus Weilburg

Der Stampflehm-bau hat in vielen Regionen eine lange Tradition, wie zum Beispiel im Osten Deutschlands, wo bis in die 50 er Jahre circa 18000 Wohngebäude mit Stampflehm errichtet wurden. In der Regel umfassten diese Gebäude zwei bis vier Stockwerke. Als markantestes Beispiel dient dabei das Wohnhaus Rath in Weilburg (Abb. 01), das sechs Stockwerke hoch ist, ohne dass die Stärke der Mauern wesentlich über jenen von herkömmlichen Ziegelbauten liegt. Vorfertigung hat bei der Herstellung dieser Häuser allerdings keine Rolle gespielt. Sie wurden an Ort und Stelle aufgebaut. Architekt W.J. Wimpf hat zwischen 1830 und 1850 mehrere solcher mehrgeschossiger Wohnhäuser gebaut, die noch heute benutzt werden.

Folgende Gründe sprechen gegen die Verwendung von Stampflehm als zukunftssträngige standardisierte Bauweise :

Erstens ist diese Bautechnologie wirtschaftlich betrachtet nicht geeignet, weil der Stampflehm in der Herstellung sehr teuer ist. Beispiele in Vorarlberg und Deutschland haben gezeigt, dass bei einer vorgefertigten Stampflehmwand mit Kosten von circa 1500.- Euro pro m³ zu rechnen ist.

Errichtungskosten	Mauerstärke	Richtwert pro m ³
Stahlbetonwand	30 cm	480.- €
Ziegelmauerwerk	50 cm	300.- €
Stampflehmmauerwerk	45 cm	1500.- €

Tabelle 01: Kostenvergleich von Stampflehmwänden zu herkömmlichen Wänden.

Zweitens ist die Vorfertigung von Stampflehmelementen zwar prinzipiell möglich, aber durch ihr hohes Gewicht auf kleinere, noch transportierbare Einheiten beschränkt.

Bei einer spezifischen Dichte von knapp 2200 kg/m³ kommt ein Element mit einer Größe von circa 1 x 3 m bei einer Wandstärke von 40 cm bereits auf ein Gewicht von 2,6 t. Durch die Beschränkung auf „kleine

Bauelemente“ fallen höhere Transportkosten an, und bei der Montage wird schweres Hebegerät benötigt. Das hat sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Nachteile, die kaum durch das Verwenden von regional verfügbarem Material kompensiert werden können.

Drittens ist die Stampflehmwand kein taugliches Bauelement für den verdichteten Flachbau in Niederösterreich, da es keinerlei Tradition in Bezug auf Stampflehm in dieser Region gibt. Vorherrschende Bauweise ist die „Wellerlehmbauweise“, oder die „gesetzte Lehmbauweise“ wie sie in Ostösterreich bezeichnet wird. Beim Wellerlehm, wo Sätze von Lehm mit Stroh aufbereitet direkt aus dem Aushub mit der Mistgabel aufgeschichtet, und dann mit einem speziellen Spaten abgestochen wurden, konnte der in Niederösterreich verbreitete Lösslehm verwendet werden, der für den Stampflehmbau aber ungeeignet ist. Die Wellerbauweise selbst ist nicht in vorfertige Bauelemente transformierbar.

Viertens spricht der schwache Wärmeschutz gegen die Verwendung von Stampflehm. So wie bei allen massiven Wänden, wären auch hier zusätzliche Wärmedämmmaßnahmen nötig. Diese können sowohl außen als auch innen angebracht sein, wobei die äußere Dämmschicht bautechnisch und bauphysikalisch besser ist. Der Wunsch, das Stampflehmmauerwerk im modernen Lehm-Bau als ästhetisches Gestaltungsmittel einzusetzen, hat eine Dämmung im Innenraum zur Folge, die aber kompliziert zu verarbeiten und bauphysikalisch ungünstig ist. Zudem werden dem Lehm die zentralen Eigenschaften und Vorteile der hohen Wärmespeicherkapazität und der Fähigkeit zu Feuchtigkeitsregulierung genommen bzw. zumindest stark geschwächt. Für die Aufnahme von Feuchtigkeit ist zwar die erste Schicht von ca. zwei Zentimetern kurzfristig entscheidend, aber es werden wertvolle Langzeitspeicherkapazitäten nicht genutzt.

Die folgende Abbildung zeigt die Abhängigkeit der Wassersorptionsfähigkeit von der Schichtdicke. Je mehr massiver Lehm vorhanden ist, desto mehr und vor allem länger kann Feuchtigkeit gespeichert werden.

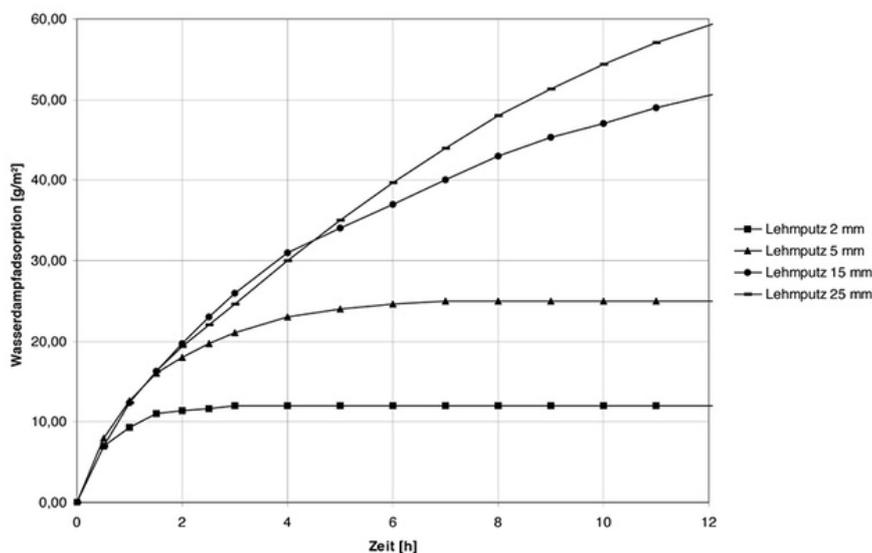


Abbildung 02 Schichtdicke Lehm und Wasserdampfadsorption

Noch wesentlich ist die im Innenraum verfügbare Schichtdicke aber für die Wärmespeicherkapazität. Die im Volksmund überlieferte Weisheit - im Sommer kühl und im Winter warm hat hier ihren Ursprung. Die nachfolgende Tabelle (Abb. 03) für Ziegelprodukte zeigt den unmittelbaren Zusammenhang von Masse und Speicherkapazität.

Wärmespeicherfähigkeit

Ziegelrohddichte kg/dm ³	Wärmespeicherfähigkeit Q in kJ/m ² K bei Wanddicken von						
	11,5 cm	17,5 cm	24,0 cm	30,0 cm	36,5 cm	42,5 cm	49,0 cm
0,6	69	105	144	180	219	255	294
0,65	75	114	156	195	237	276	319
0,7	81	123	168	210	256	298	343
0,75	86	131	180	225	274	319	368
0,8	92	140	192	240	292	340	392
0,9	104	158	216	270	329	383	441
1,0	115	175	240	300	365	425	490
1,2	138	210	288	360	438	510	588
1,4	161	245	336	420	511	595	686
1,6	184	280	384	480	584	680	784

Bei beidseitigem 1,5 cm dickem Putz sind jeweils 51 kJ/m²K hinzuzurechnen.

Abbildung 03: Quelle: Firma Wienerberger. www.wienerberger.de

Vergleichbar mit einem „leichten Stampflehm“ (Rohddichte von 1,6 kg/dm³) hat eine 11,5 cm starke Mauer mit eben dieser Rohddichte knapp 4 Mal weniger Wärmespeicherfähigkeit als eine massive Mauer mit 42 cm. Wenn man das Stampflehm-mauerwerk innen dämmt, bleibt als Speichermasse nur mehr der Lehmputz: Bei einer üblichen Putzstärke von 1,5 cm erzielt man gerade mal eine Wärmespeicherfähigkeit von 50 KJ/m²K. Man verschenkt mit einer Innendämmung also mehr als 80% an möglicher Speicherkapazität.

2.1.1. ZUSAMMENFASSUNG STAMPFLEHMBAU

Eine Stampflehmwand ist für den vorgefertigten und standardisierten Einsatz im verdichteten Flachbau in NÖ nicht geeignet.

1. Die Lehmvorkommen in Niederösterreich sind für den Stampflehm-bau ungeeignet.
2. Eine industrielle Vorfertigung wäre mit hohen Transport- und Montagekosten verbunden.
3. Stampflehmelemente sind selbst mit Vorfertigung wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig.
4. Stampflehmwände müssen ähnlich wie andere massive Wände zusätzlich gedämmt werden. Außendämmungen vergrößern die ohnehin schon großen Wandstärken noch mehr, und Innendämmungen, wie es derzeit üblich ist, verspielen zwei wesentliche bauphysikalische Eigenschaften: Speicherung von Feuchte und Wärme bezogen auf eine längere Periodendauer im Rauminnen.

2.2. HYPOKAUSTENLEHMMAUERWERK.

Im Prinzip ist mit dieser Bauweise ein zweischaliges massives Lehm-mauerwerk definiert das im Zwischenraum entweder mit einer Luftschicht Wärme weiterleitet oder mittels einer Kerndämmung aktivierte Bauteile trennt. Auch monolithische Bauwerke mit Bauteilaktivierung sind in dieser Hinsicht interessant.

Als Beispiel wird der vom Architekturbüro SANAA geplante Zollverein in Essen herangezogen und im Hinblick auf eine Anwendung mit Lehm überprüft.

Das Betongebäude von SANAA kommt gänzlich ohne Wärmedämmung aus. Die Grundidee ist innen und außen die Stahlbetonwand als Gestaltungselement sichtbar zu belassen. Bei einem Aufbau mit

klassischer Kerndämmung wären Wandstärken von 55 bis 60 cm notwendig, während mit der massiven einschaligen Betonwand und aktiver Wärmedämmung 30 cm ausreichen. In der monolithischen Stahlbetonwand sind Kunststoffrohre in einem engen Raster verlegt, die von einer geothermischen Wärmequelle gespeist werden.

Der große Vorteil dieser Form von Wärmeübertragung ist die Wärmeabstrahlung der Bauteile. Denn für die Behaglichkeit in einem Innenraum ist - neben der Lufttemperatur und Luftfeuchte - vor allem der Unterschied der Temperatur der Bauteile zu der des Nutzers verantwortlich. Je kühler die Bauteile abstrahlen, desto mehr warme Luft muss produziert werden, um für den Bewohner ein subjektiv behagliches Raumklima zu erhalten. Und je wärmer ein Bauteil ist, desto weniger Konvektionswärme wird benötigt. Ein Raum mit 23 Grad Lufttemperatur kann im ersten Fall (Konvektion) als kühl und im zweiten Fall (Strahlungswärme) als viel zu warm empfunden werden. Das gilt reziprok auch für die Kühlung von Räumen.

Man trachtet also, aus ökologischen (weniger Energieverbrauch) und aus baubiologischen (Behaglichkeit) Gründen, dem Körper angepasste Oberflächentemperaturen zu bekommen, die in den Raum abstrahlen. Das ist mit massiven Bauelementen, wie etwa Beton, Ziegel oder eben Lehm sehr gut möglich.

Eine massive Lehm-mauer - Stampflehm- oder Lehmziegelwand - könnte mit einem Rohrsystem ausgestattet werden, das warme oder kühle Flüssigkeit transportieren kann. Im besten Fall könnte man – wie beim Zollverein Essen – auf die Dämmung komplett verzichten und somit die Wärmespeicherkapazität innen und außen optimal ausnützen. Das bedeutet, dass die Dämmung des Gebäudes eine untergeordnete Rolle spielen würde.

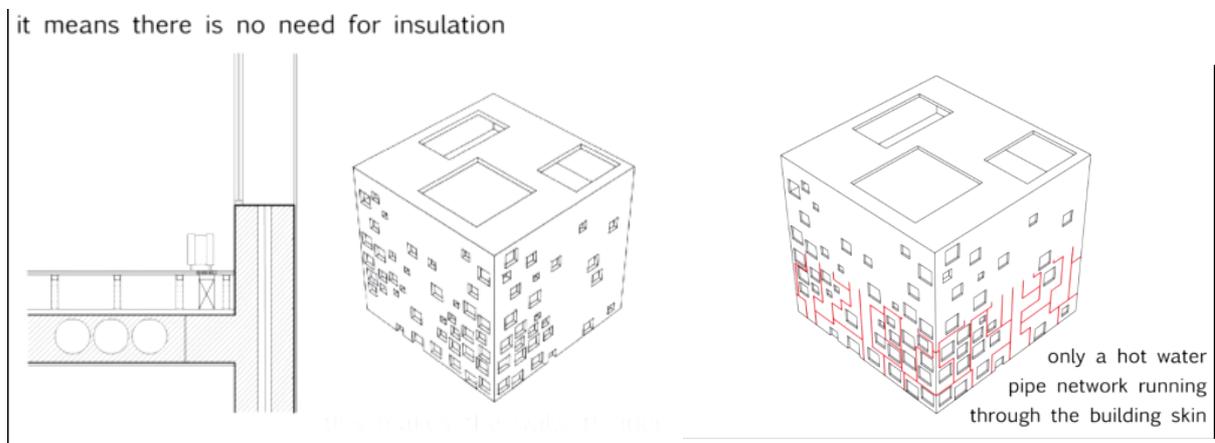


Abbildung 04: Zollverein in Essen. Architekturbüro SANAA.

Ein andere Variante einer Hypokaustenwand sind zweischalige Systeme. Bei einer schon im Jahre 1998 durchgeführten Untersuchung des Fraunhofer Instituts (Künzel, 1998) werden zweischalige Mauerwerke (vor allem mit einer Kerndämmung) als bauphysikalisch unbedenklich beschrieben. Tauwasseranfall wäre bei richtiger Ausführung im Inneren der Wand nicht zu befürchten. Kann man Lehmbaustoffe so standardisieren, dass sie für massive „Hypokaustenwände“ einsetzbar sind? Und weiters gefragt: Kann ein massives, vorgefertigtes Lehmwandelement wirtschaftlich hergestellt und transportiert werden?

2.2.1. STATIK EINES HYPOKAUSTENLEHMMAUERWERKS

Aus statischer Sicht ist ein *zweischaliges* Mauerwerk in Lehm problematisch, da zwei „schmale“ Bauelemente unabhängig voneinander aufgebaut werden müssen. Die innere Schale könnte der tragende, der äußere der schützende Teil sein. Als Konstruktionsweisen kommen Lehmziegel oder eine Stampflehmkonstruktion in Frage. Unter 30 cm Wandstärke ist aber im konstruktiven Lehm bau keinerlei Lastabtragung möglich. Es sind bei höheren Lastenwirkungen durch Mehrgeschossigkeit außerdem noch höhere Wandstärken zu erwarten. Die innere tragende Schicht wäre je nach Lastanfall mit mindestens 30 bis 50 cm zu bemessen. Die äußere Wand ist zwar nicht tragend, aber doch freistehend, und daher auch statisch relevant. Daher müsste auch diese Mauer mind. 30 cm stark sein. Bei einer Annahme von mindestens 10 – 14 cm Kerndämmung, würde sich eine Gesamtmauerdicke von 70 – 95 cm ergeben! *Monolithische* Bauteile hingegen sind schmaler und aus Sicht der Tragwerksplanung ähnlich dem SANAA Projekt in Essen prinzipiell auch für Lehm bauten machbar. Eine Stampflehmwand mit ca. 40 – 50 cm Wandstärke könnte Installationsrohre beinhalten, die Wärme und Kälte für eine aktive Wärmedämmung transportieren können. Allerdings ergeben sich im Hinblick auf Vorfertigung und Transportierbarkeit die gleichen Probleme wie bei der Stampflehmwand (siehe Kap. 1.1. Stampflehm bau).

2.2.2. BAUPHYSIK EINES HYPOKAUSTENLEHMMAUERWERKS

Aus bauphysikalischer Sicht ist ein *zweischaliges* Mauerwerk zwar unproblematisch, aber vernünftige U - Werte sind nur mit einer starken Kerndämmung möglich. Zweischalige Bauwerke haben aber, neben einem getrennten Transport der beiden Bauteile, noch zusätzlich das Problem, dass bauphysikalisch bedeutsame Anschlüsse der luftdichten und winddichten Ebene wiederum vor Ort ausgeführt werden müssten, und das Risiko für Fehleranfälligkeit dadurch hoch ist. *Monolithische* Bauteile sind bauphysikalisch unbedenklich, aber die Herstellung von Energie für die aktive Wärmedämmung ist, außer bei vorhandenen natürlichen Ressourcen wie zum Beispiel einer Thermalquelle nicht energieeffizient zu erzielen. Das Feuer der römischen Hypokauste ist nur durch hochenergetischen Eintrag ersetzbar, da nicht nur die Raumluft erwärmt wird, sondern auch die Kälte von außen abgepuffert werden muss. Das SANAA Projekt stellt hier also nur einen glücklichen Einzelfall dar, weil auf dem Grundstück eine Thermalquelle vorhanden war. Standardisierbar ist dieses Prinzip nicht.

2.2.3. VORFERTIGUNG EINES HYPOKAUSTENLEHMMAUERWERKS

Dünnwandige Hohlkammerelemente aus Lehm lassen sich schwer herstellen, da Lehm aufgrund seiner schlechten Zugfestigkeitseigenschaften zu Bruch neigt. Eine wirtschaftliche und vor allem energieeffiziente Herstellung ist nicht gegeben, da mit Glasfaser oder anderen zugfesten künstlichen Fasern die Zugfestigkeit erhöht werden müsste, ohne jedoch jemals Werte von Beton annähernd zu erreichen, d.h. es kann – wie oben erwähnt nur mit großen Wandstärken kompensiert werden.

2.2.4. REGIONALE WERTSCHÖPFUNG EINES HYPOKAUSTENLEHMMAUERWERKS

Die breite regionale Integration ist nicht gegeben, da nur hochspezialisierte Unternehmen dieses Element herstellen und versetzen können.

2.2.5. ZUSAMMENFASSUNG: BEWERTUNG EINER HYPOKAUSTENLEHMMAUER

Bei der Bewertung der Systeme für eine „Hypokaustenmauer“ hat die *zweischalige* Massivmauer, die der klassischen römischen Hypokaustenmauer ähnelt, bezogen auf den konstruktiven Lehm- und Ziegelbau den Nachteil von massiven und großdimensionierten Wandstärken. Eine vernünftige Vorfertigung ist daher nicht möglich. Zudem wäre der Ressourceneinsatz durch zwei separate, tragende Mauern sehr hoch. Die äußere Schicht müsste zusätzlich wärmedämmend ausgeführt werden. Der zweischalige Aufbau mit gegenseitigen Durchdringungen von Installationsleitungen stellt für die Wind- und Luftdichtigkeit von Gebäuden große Risiken bei einer schlechten Ausführung dar. Die Gefahr von Bauschäden ist daher sehr hoch.

Die *einschalige* Mauer mit einer aktivierten Wärmedämmung wäre prinzipiell auch mit Lehm herstellbar. Bauphysikalisch ist das ein problemloses und einfaches System. Da Lehm im Gegensatz zu Beton aber keine guten statischen Eigenschaften hat, muss die Gesamtwandstärke entsprechend groß sein und wächst mit jedem weiteren Geschoss. Eine wirtschaftlich vernünftige Vorfertigung ist ähnlich wie bei der Stampflehm- oder Ziegelmauer nicht zu prognostizieren.

Zudem haben alle aktivierten Wärmedämmungen den Nachteil, dass sie viel Energie benötigen. Wenn diese zum Beispiel durch eine natürliche Thermalquelle vorhanden ist, kann ein ökologisch sinnvoller Einsatz in Betracht gezogen werden. Wenn man aber Energie für die Aktivierung der Bauteile erzeugen muss, wird das, was man an Primärenergie für die Herstellung von Baustoffen einspart, durch den kontinuierlichen Einsatz von Energie zur Dämmung des Gebäudes mehr als kompensiert. Baubiologisch betrachtet ist das wärmestrahlende, monolithische Bausystem in jedem Fall positiv für die Behaglichkeit des Nutzers.

Auch dieses System wird als nicht - oder vielleicht noch nicht - tauglich erachtet, um die Thesen und Erwartungen an ein standardisier- und vorfertigbares Bausystem in Lehm positiv zu prognostizieren.

2.3. LEHMMAUER MIT EINER TRAGENDEN HOLZSTRUKTUR

Diese Bauweise findet man in der Fachliteratur unter dem Begriff Leichtlehm- oder Holzlehm-Bau. Dieser basiert im Prinzip auf einem Holzleichtbau. Dabei werden auf ein Ständer- oder Skelettragwerk aus Holz beidseitig Lehmschichten aufgetragen, die bauphysikalische Funktionen übernehmen können. Bis dato werden die Lehmschichten vorwiegend händisch und vor Ort aufgebracht. Für den Selbstbauer und in Schwellenländern mit „billigen Arbeitskräften“ stellt diese Bauweise eine gute und kostengünstige Alternative zum herkömmlichen Bauen dar.



Abbildung 05: Klassische Holzständerwände, die händisch mit Lehm ausgefacht werden.

Abbildung 05 veranschaulicht, wie beim Leichtlehm- und Holzständerbau auf eine Holzständerkonstruktion mittels Schalung entsprechende Lehmmischungen aufgezogen werden. Diese für den Selbstbau geeignete Bauweise ist - wirtschaftlich betrachtet - gegenüber dem konventionellen Holzleichtbau nicht konkurrenzfähig. Als Folge wurden nach und nach vorfertig- und industriell herstellbare Bauelemente untersucht und entwickelt.

Trotz des hohen Vorfertigungsgrades ist aber letztendlich bei allen untersuchten Leichtbausystemen so, dass alle Bauteilanschlüsse und Fugen erst auf der Baustelle ausgeführt werden. Das bedeutet, dass das witterungsabhängige und fehleranfällige Bauen vor Ort damit nicht entscheidend verbessert werden konnte.

Die Erfahrungen, die aus vielen Projekten vorliegen, zeigen, dass in Systemen, bei denen eine tragende Struktur von Lehm ausgefacht wird, ein großes Potential liegt. Der geeignete Konstruktionspartner ist in diesem Fall der natürliche Baustoff Holz, der viele ähnliche Eigenschaften wie Lehm aufweist; erwähnt sei zum Beispiel die Fähigkeit zur Feuchtigkeitsregulierung.

Holz trägt, Lehm schützt. Dieses Prinzip soll in einem neuen Holz-Lehm-Verbundsystem entwickelt und nachgewiesen werden.

2.3.1. ZUSAMMENFASSUNG LEHMMAUER MIT EINER TRAGENDEN HOLZSTRUKTUR

Eine Lehm- und Holzständermauer mit einem vorgefertigten Holzsystem scheint für den Einsatz im verdichteten Flachbau in NÖ sehr gut geeignet. Einerseits wird von diesem neuen Verbundsystem ein sehr hoher Grad an Vorfertigung erwartet, und andererseits kann der in NÖ vorkommende Lößlehm verwendet werden; ein positiver Aspekt für die regionale Wertschöpfung.

Allerdings ist dafür eine komplette Neuentwicklung einer Holz-Lehm-Verbundbauweise notwendig, da keine bestehenden oder bislang verwendeten Systeme die geforderten Parameter erfüllen können. Im Zuge dieses Forschungsprojektes wird deshalb ein neues Bausystem aus Holz und Lehm entwickelt, das nach bisherigem Stand der Untersuchung die hohen Erwartungen dieser Studie bezogen auf Vorfertigung, Wirtschaftlichkeit, regionale Wertschöpfung und Ökologie bzw. Baubiologie erfüllen kann.

3. STAND DER FORSCHUNG ZUM HOLZ-LEHMBAU

Bevor auf das neue System eingegangen wird, möchte ich noch einen kurzen Abriss über den Stand der Forschung, bzw. schon bestehender Bausysteme machen. In einem Vergleich der Systeme sind dann Vor- und Nachteile ersichtlich, bzw. wird dargestellt, worin der Nutzen eines weiteren neuen Bausystems liegt. Vorab möchte ich auf das Buch von FRANZ VOLHARD : Bauen mit Leichtlehm. Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm verweisen. In diesem umfassenden Werk wird in sehr kompetenter Weise ein Überblick über den Stand der Technik im Holz – Lehmbau gegeben. Egal ob es sich um Ausfachungen, um vorgestellte Stapelwände oder um in Schalungen hochgezogene Lehmwände auf Holzunterkonstruktionen handelt, gemeinsam ist allen Projekten ein hoher Grad an Leistung auf der Baustelle. Viele der gezeigten Beispiele sind stark auf Eigenleistung ausgerichtet. Systeme, die standardisiert als Bausystem zu bewerten sind, oder gute Prognosen dafür haben, sind keine aufgeführt. Von unschätzbarem Wert sind aber die Studien und Forschungen von Franz Volhard, die er seit den 80er durchführt, und in nun bereits sieben Auflagen veröffentlicht hat. Erkenntnisse und Messergebnisse konnten aus zahlreichen experimentellen Bauprojekten gewonnen werden, die er persönlich umgesetzt hat. Das ist auch deshalb von großer Bedeutung, weil es keinen eigenen Lehrstuhl für Lehmbau im universitären Bereich gibt. Weiters gibt es außer den Lehmbauregeln in Deutschland keine verbindlichen Normen im Lehmbau und schon gar nicht im Holz-Lehmbau. Prüfungen und Zertifikate von Lehmbauteilen sind nur in sehr geringem Umfang vorhanden. Normen sind in der Zwischenzeit für Lehmputze und Lehmziegel eingeführt, nur ein kleiner Ausschnitt der Möglichkeiten im Lehmbau. Ein Beispiel stellvertretend: eine Holzkonstruktion, die mit Lehm händisch umwickelt und vollständig eingeschlossen wird.

Aus dem Forschungsprogramm Haus der Zukunft seien zwei weitere Projekte erwähnt, die einen höheren Vorfertigungsgrad erreicht haben.

Wegweisend ist das Projekt Lehmpassivhaus Tattendorf von Roland Meingast, das 1999 als Forschungsprojekt gestartet und 2004 bzw. 2005 realisiert wurde . Es geht von Wand- und Deckenmodulen aus, die als eine Art Hohlkastenelement mit Strohballen, und später mit Strohhäcksel gefüllt werden. Innen und außen wird eine Lehmputzschicht im Werk direkt auf das Element aufgebracht und dann als Fertigteil auf die Baustelle geliefert.

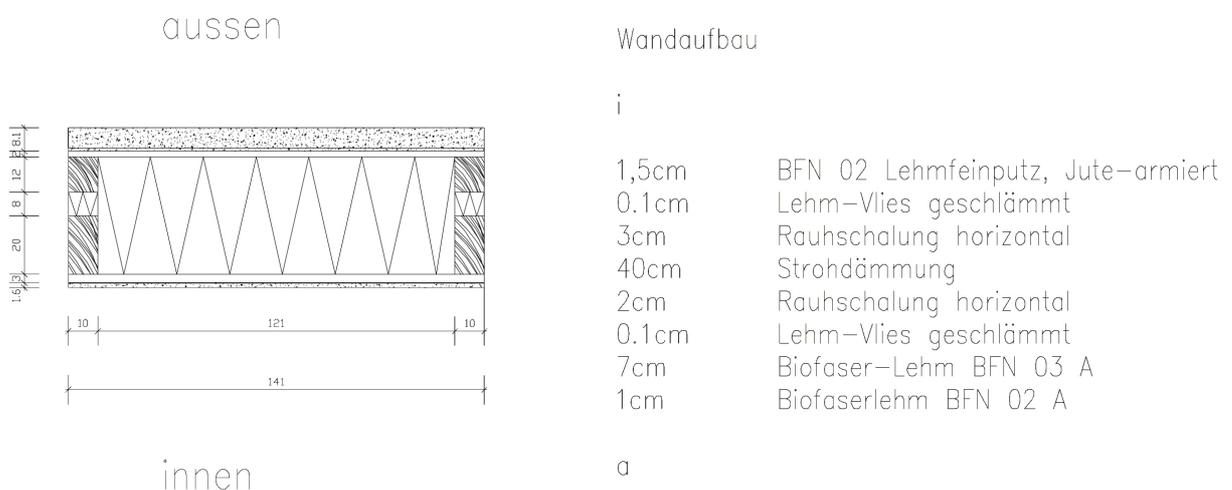


Abbildung 06: Wandaufbau. Prototyp Passivhaus Tattendorf.

Im Innenraum ist dieser allerdings als dünner Lehmputz auf einer Lehm-Vliesschlämme ausgeführt, der leider wenig Beitrag zum Raumklima leisten kann. Basierend auf mehreren Untersuchungen ist mindestens ein Lehmputz von 2cm für eine ausreichende Regulierung der Raumfeuchte empfohlen. Weiters kann der dünne Lehmputz keinen substantiellen Beitrag zur Wärmespeicherwirksamkeit leisten.

Eine horizontale Verschalung in der Holzkonstruktion kann keinen Beitrag zur notwendigen Gebäudeaussteifung liefern. Das müsste über andere Maßnahmen erfolgen. Die Wind- und Luftdichtigkeit wird über Lehmschlämme im Vlies erzeugt. Insgesamt unterscheidet sich der Aufbau nicht vom herkömmlichen Schichtaufbau einer Holzrahmenkonstruktion außer in der sehr innovativen Anwendung von natürlichen statt künstlichen Baustoffen

Ausgehend vom Prototyp Tattendorf wird derzeit mit dem schon am Markt angebotenen LOPAS System die Serienreife angestrebt. Statt der horizontalen Schalung werden OSB Platten innen und außen verwendet, die einerseits die nötige horizontale Aussteifung des Gebäudes sichern, und andererseits für das erforderliche Dampfdiffusionsgefälle sorgen. Eine durchgehende und konsequente Verwendung von natürlichen Baustoffen ist hier unterbrochen. Auch ist das Einbringen der Strohhäckselddämmung sowohl technisch als auch wirtschaftlich noch nicht geklärt, und bedarf offensichtlich weiterer Studien.

Die Grundidee dieses Systems basiert auf einem klassischen mehrschichtigen Aufbau, der im Holzrahmenbau üblich ist. Das Besondere ist, dass die vielen Schichten, die normalerweise mit künstlichen Baustoffen ausgeführt werden, hier mit weitestgehend - aber eben doch nicht vollständig - mit natürlichen Baustoffen ersetzt werden.

Ein zweites interessantes Projekt im Forschungsbereich von „Haus der Zukunft“ ist ein Gewerbebau des Biobauernhofes Achleitner. Grundkonzept ist wie im oben genannten Projekt LOPAS wieder eine klassische Holzrahmenkonstruktion, die mit Stroh gedämmt wird. Für die Raumregulierung wird ein Lehmputz im Inneren aufgebracht. Der Grad an Vorfertigung ist gering. Interessanter Forschungsaspekt ist eine Untersuchung über die Regulierungsfähigkeit von Pflanzen in Bezug auf das Raumklima.

Bei der Durchsicht von Patenten ist ein System von PYTLIK erwähnenswert, das von einer vorgefertigten Innen- bzw. Außenschale in Holz-Lehmbauweise ausgeht. Um eine Holzkonstruktion, die als Skelettkonstruktion ausgeführt ist, wird Lehm gewickelt. Die Fichtenlatten, die den Lehm halten sind außen sichtbar.

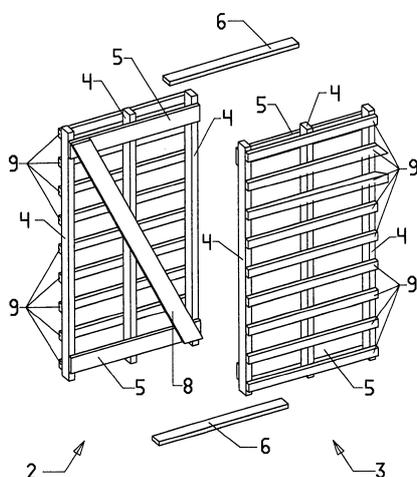


Fig. 6

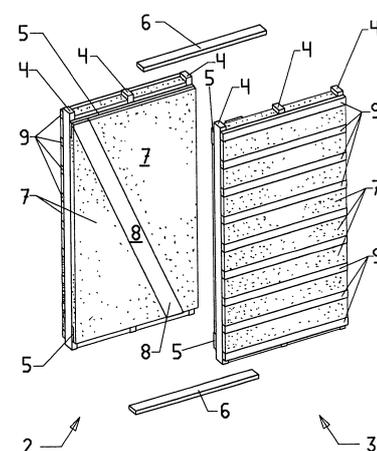


Fig. 8

Die innere und äußere Schale scheinen gleich aufgebaut, und werden laut Patent DE 199 51 231 B4 2008.06.12 getrennt auf die Baustelle transportiert und dort miteinander verbunden. Laut den beiliegenden Skizzen ist es nicht ersichtlich, ob die Elemente allen bauphysikalischen Anforderungen entsprechen können. Zumindest die Luft- und Winddichtigkeit kann ohne zusätzlichen Putz schwer gegeben sein, weil zwischen Latten und Lehmwickel Fugen entstehen. Auch ist anzuzweifeln, dass mit Lehm und Lehmfüllung allein die geforderten Wärmedämmwerte zu erzielen sind. Das wird auch der Grund sein, warum das Element, obwohl für 2013 fix angekündigt, noch nicht auf dem Markt ist.

4. VERGLEICH HOLZLEICHTBAU UND MASSIVBAU

Das hier beschriebene Holz-Lehm-Verbundsystem (Idee, Konzeption und Copyright Mag. Andreas Breuss MSc.) ist ein Hybrid aus einer Leicht- mit einer Massivbauweise, wobei jeweils die Stärken der einzelnen Systeme genutzt und neu kombiniert werden. Holz trägt. Lehm schützt. Das ist der einfache Grundgedanke. Was sind die Vor- und Nachteile, die Stärken und Schwächen der beiden Bauweisen?

Beim Holzleichtbau können Wandelemente so im Werk hergestellt werden, dass Innenhülle, dazwischen liegende Dämmschicht und Außenhülle mit integrierten Installationen - optional auch mit Fenstern und Türen - bereits fertig auf die Baustelle geliefert werden. Die Vorfertigung kann sogar so weit gehen, dass Fassadenelemente aus Holz bereits vormontiert sind.

Die Rahmenelemente selbst bestehen aus einer tragfähigen Ständerkonstruktion mit leimfreiem Konstruktionsvollholz, über die vertikale Lasten der Geschossdecken und des Daches abgeleitet werden. „Das Ausknicken der tragenden Holzständer wird in der Wandebene durch die Beplankung verhindert.....Wandstützen mit einem Querschnitt von 60x120 mm sind bei einer Knicklänge von 2750 mm und einem maximalen Stützabstand von 650 mm in der Lage, die gleichmäßig verteilten Lasten bei ein- bis zweigeschossigen Wohnbautenaufzunehmen. Die größtmögliche Belastung der tragenden Holzwände wird in der Regel durch die zulässige Querdruckspannung in Schwelle und Pfette bestimmt.“ [KOLB, 2010, S. 79]

Das bedeutet, dass je höher das Gebäude wird, desto mehr vertikale Lasten auf Stützen und Schwellen übertragen werden, und diese stärker ausgebildet werden müssen. Der Vorteil ist, dass sich - je nach statischer Anforderung - nur die Dimensionen der Holzkonstruktion ändern muss und bei gleichbleibendem Schichtenaufbau eine maximale Flexibilität in der Anwendung erzielt werden kann. Dabei übernimmt die Beplankung der Ständerkonstruktion statisch die Gebäudeaussteifung gegenüber horizontalen Lasten, die zB bei großen Windkräften und Erdbeben auftreten. Das System der Holzrahmenbauweise ist ausgereift, tausendfach in der Praxis erprobt und auch in Bezug auf Wirtschaftlichkeit optimiert. Ein zusätzlicher Vorteil gegenüber dem Massivholzbau beispielsweise ist der relativ geringe Ressourcenverbrauch von Holz, und dass weitgehend leimfreie Holzprodukte verwendet werden können.

Der große Nachteil des Rahmenbaus hingegen ist, dass man viele unterschiedliche Schichten benötigt, damit das Leichtbausystem bauphysikalisch funktioniert. Das sind neben der Wärmedämmung vor allem

jene Stoffe, die Wind- und Luftdichtigkeit gewährleisten. Die innere luftdichte Ebene ist zusätzlich eine Dampfbremse, die das Eindringen von Wasserdampf aus dem Innenraum verhindert.

Die nachfolgende Abbildung (Abb. 08) illustriert sehr prägnant, wie aufwändig es ist, mit abgeklebten Stößen und ausgeschäumten Ecken eine innere luftdichte Ebene zu erzeugen, bzw. wie sehr die Qualität von der richtigen Ausführung durch den Handwerker abhängig ist. Für die exakte bauphysikalische Ausführung sind eine große Anzahl von künstlichen und chemischen Baustoffen nötig - wie in der

Luftdichtheit



09.01.2006

Dr. Martin Teibinger

Abbildung 08 OSB Platte, Klebebänder und Schäume sind notwendig um eine innere luftdichte Ebene zu erzeugen, die speziell an den Stößen und Übergängen ein großes Risiko für falsche Ausführung birgt.

Abbildung ersichtlich - zum Beispiel OSB Platten, die kritische Isocyanate in den Innenraum bringen, sowie chemieintensive Baustoffe wie Klebebänder und Bauschäume.

Im einfachen Regelfall sind circa sieben unterschiedliche Schichten nötig um den Holzleichtbau frei von bautechnischen Schäden zu halten. Trotz des hohen Einsatzes an künstlichen Baustoffen, hängt die Qualität letztendlich nur vom Ausführenden ab. Das beste Klebeband nutzt nichts, wenn es nicht fachgerecht oder schlampig montiert wird. Eine grobe Auflistung aller benötigten Stoffe für die Realisierung der Schichten ergibt selbst unter Berücksichtigung von unvollständigen Firmenangaben eine lange Liste ressourcenfeindlicher und umweltschädigender Inhaltsstoffe, die zudem den Innenraum belasten: Polyurethan (PU), Polypropylen (PP), Additive zur Erhöhung der Porenstruktur, PVC, PUR – Bindemittel, polymeres Diphenylmethandiisocyanat (PMDI Leime), Polyharnstoffverbindungen, Paraffinwachsemulsion, Zellulose, Glasseidengelege, Polypropylengelege, Polyethylengelege, Polyolefine, Polyethylen, Copolymere, Polymerbitumen, Acrylate, PET, Polyester (PES), Aluminium, Glas, Sodaasche, Bakelit, Mineralöl, Magnesium, Kunstharz und vieles mehr.

Ein weiterer Nachteil der Holzrahmenbauweise ist ihre generell sehr geringe Speicherfähigkeit. Aufbauten in den Bauteilkatalogen von Dataholz (siehe Dataholz Detailkatalog. awropo 16a-00) weisen inklusive Gipskartonplatten ein $m_{w,B,A}[\text{kg/m}^2]$ von 27 bzw. knapp 29 kg auf. Eine Ziegelmauer hat im Vergleich dazu ein deutlich besseres Wärmespeichervermögen ($m_{w,B,A}[\text{kg/m}^2] = 50 - 60 \text{ kg}$).

Eine höhere Speichermasse bewirkt eine langsamere Auskühlung und Erwärmung eines Raumes. Zudem erhöht sich die Abstrahlwärme der Baustoffe, was wiederum auf die Behaglichkeit einen großen Einfluss hat.

Untersuchungen belegen, dass mit einer guten Wärmedämmung auch eine hohe Speicherkapazität einhergehen sollte. Dies bewirkt vor allem in Spitzenzeiten (zum Beispiel bei sommerlicher Überhitzung) flachere Kurven im Temperaturverlauf. Erwartungsgemäß verringern auch Vorsatzschalen den Effekt großer Speichermassen.

Studien belegen auch, dass sich der Heizenergiebedarf mit großer Speichermasse verringert.

Untersuchungsergebnisse einer Studie des Ingenieurbüros ALWare aus Braunschweig wurden 2016 auch in einer Diplomarbeit an der TU Wien, Institut für Bauphysik, überprüft und bestätigt. [vgl. Wurm, 2016]. Abb. 09 zeigt einerseits, dass die Schwankungen der Raumtemperatur bezogen auf die Außentemperatur - zum Beispiel in einer Augustwoche - bei einem Holzrahmenbau stärker sind als bei einem massiven Ziegelhaus. Auch über das ganze Jahr gesehen ist die Überhitzung (mehr als 28 Grad) in Südräumen bei Holzrahmenbauten deutlich höher als bei einem massiven Ziegelbau.

Bestätigt werden konnte auch die These, dass der Heizenergiebedarf im Holzleichtbauhaus signifikant höher ist als im Massivhaus. [vgl. Wurm, 2016, S. 69 ff.]

Die speicherwirksame Masse hat einen signifikanten Einfluss auf Temperaturschwankung und Heizenergiebedarf. Es hat sich allerdings auch gezeigt, dass Verschattung und die Möglichkeit einer Nachtdurchlüftung entscheidende Faktoren sind, Gebäude mit einer hohen speicherwirksamen Baumasse noch stabiler in der Raumtemperatur halten zu können.

Wenn man Räume mit einer hohen Speichermasse im Winter lüftet (Stoßlüftung), verändert sich die Temperatur im Rauminneren nicht, da Wärme aus den Speichern abgegeben wird - im Gegensatz zu leichten Gebäuden, wo nach dem Lüften ein Temperaturabfall erkennbar wird und deshalb nachgeheizt werden muss.

Aufbau der Außenwände:

Holzhaus ($U = 0,137 \text{ W/m}^2\text{K}$):
 Holzständer (Gefach + Konstruktion)
 Schichtaufbau von innen nach außen:

Schicht	Dicke d [mm]	λ [W/mK]	
1	Holzfasерplatte	16	0,170
2	Steinwolle	30	0,036
3	Holzfasерplatte	16	0,170
4	Steinwolle	200	0,036
5	Holzpfosten	52	0,120
6	Holzfasерplatte	16	0,170

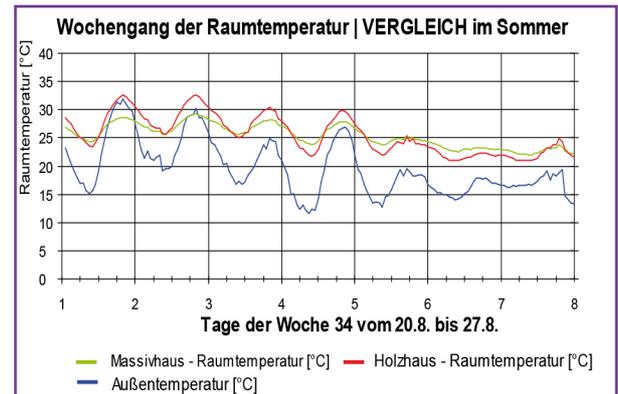
Massivhaus ($U = 0,139 \text{ W/m}^2\text{K}$)
 Mauerwerk mit Außendämmung
 Schichtaufbau von innen nach außen:

Schicht	Dicke d [mm]	λ [W/mK]	
1	Dünnlagenputz	5	0,700
2	Mauerwerk $\rho=1,8$	150	0,990
3	Polystyrol	240	0,035
4	Dünnlagenputz	5	0,700

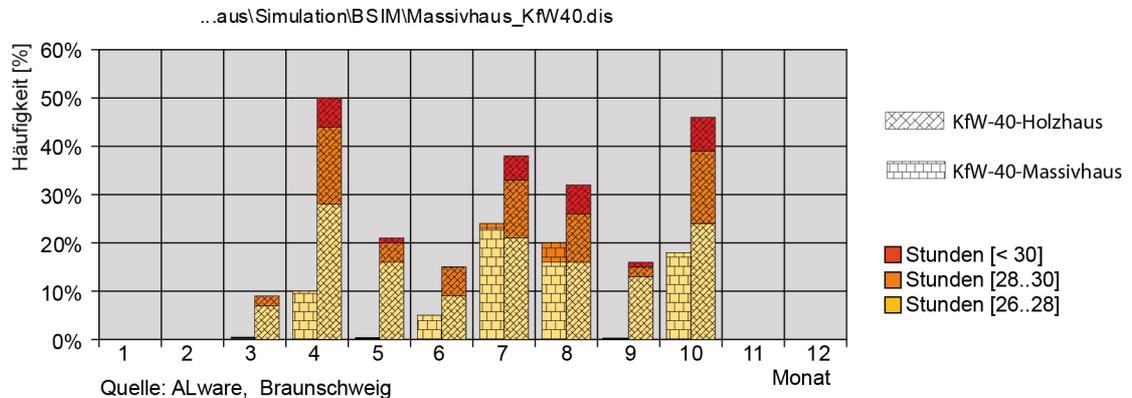
Ergebnis der Temperaturgang-Simulation:

Bei gleichem solaren Wärmeeintrag

- überhitzt das Massivhaus (maximal $29,2^\circ\text{C}$) weniger als das Holzhaus (maximal $33,1^\circ\text{C}$)
- ist die tägliche Temperaturschwankung im Massivhaus geringer als im Holzhaus



Monatliche Überhitzungshäufigkeit - KfW-40-Haus - Südräume



Daten zum Energiebedarf und zur Überlüftungshäufigkeit:

	Massivhaus	Holzhaus	Differenz
Heizenergie pro m^2 u. Jahr	25,6 kWh/ m^2a	28,0 kWh/ m^2a	9,14 %
Heizenergie gesamt im Jahr	3.384 kWh/a	3.805 kWh/a	421 kWh/a (@ 11 %)
max. Heizleistung pro m^2	54,9 W/ m^2	71,4 W/ m^2	7,68 %
Heizleistung gesamt	7,26 kW	9,85 kW	2,44 kW
Überhitzungshäufigkeit (thermische Zone Süd)	7,1 %	19,2 %	12,1 %

Abbildung 09: ALware. Vergleich Holzleichtbau und Massivbau in Bezug auf die Speichermasse.

5. BAUPHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN VON HOLZ UND LEHM

5.1. FEUCHTESCHUTZ

Sowohl Lehm als auch Holz besitzen hygroscopische Eigenschaften, da sie Feuchtigkeit aufnehmen und auch wieder abgeben können. Unterschiede gibt es hinsichtlich der **Gleichgewichtsfeuchte**. Gemessen in einem Raum mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % beträgt sie bei Lehm ca 3 Masse-%. Holz hingegen hat bei gleichen Bedingungen ca 10 Masse-%.

Die Gleichgewichtsfeuchte bezeichnet den durchschnittlichen Feuchtegehalt eines Baustoffes, der im Gebrauchszustand bei konstanter Luftfeuchte in der Regel nicht mehr über- oder unterschritten wird. Bei einer Veränderung der Luftfeuchtigkeit ändert sich das Sorptionsverhalten, das die Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit bezeichnet, d.h. wenn die Luftfeuchtigkeit hoch ist, steigt auch die Gleichgewichtsfeuchte

und dadurch die Fähigkeit, Feuchtigkeit aus der umgebenden Luft aufzunehmen. Lehm hat im Vergleich mit anderen Baustoffen das beste Sorptionsverhalten.

So kann ein ca 12 cm starkes Lehmelement [vgl. MINKE, 2004, S. 23 f.] innerhalb von 48 Stunden ca 300 g/m² Wandfläche, und in 16 Tagen bis zu 900 g/m² aufnehmen.

Neben der großen Feuchtigkeitsmenge ist vor allem die Geschwindigkeit dieser Aufnahme der große Vorteil gegenüber anderen Baustoffen. MINKE hat sehr umfangreiche Untersuchungen gemacht, die in Abb. 10 verdeutlicht werden. Um beim Vergleich Holz zu Lehm zu bleiben zeigt sich dass Holz weniger und langsamer Feuchtigkeit aufnehmen und wieder abgeben kann. Das bedeutet, dass Lehm dem Holz mehr und schneller Feuchtigkeit entziehen kann, denn „unter der Voraussetzung der Trockenhaltung des Lehmes im Bauteil sowie eines permanenten diffusionswirksamen Verbundes beider Baustoffe stellt sich ein Diffusionsgefälle der Gleichgewichtsfeuchte des Holzes zum Lehm ein: der Lehm hält das Holz in der Konstruktion trocken und wirkt dadurch konservierend. Pilze und Holzschädlinge finden auf Dauer kein ausreichend feuchtes Lebensmilieu. Das Holz kann in der Konstruktion im Verbund mit dem Lehm über Jahrhunderte seine Funktion erfüllen.“ [SCHROEDER, 2010, S. 273]

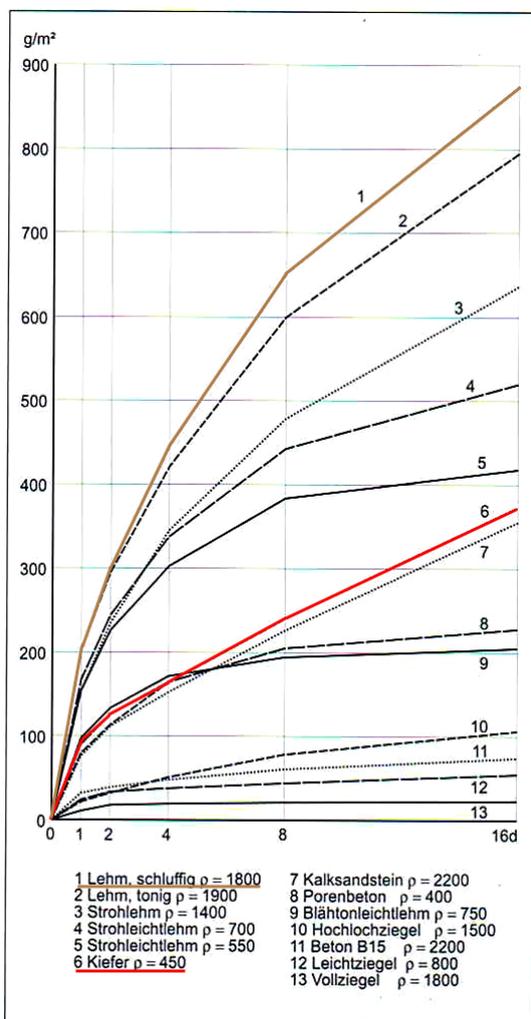


Abbildung 10. Sorptionenaufnahmevermögen von Baustoffen bei einer Zunahme der Luftfeuchtigkeit von 50 % auf 80 % und einer Raumtemperatur von 21 ° Grad C

Lehm und Holzverbundkonstruktionen benötigen also den Einsatz von diffusionsoffenen Baustoffen, denn durch die kapillare Leitfähigkeit von Lehm wird, wenn nötig,

Feuchtigkeit aus dem Inneren der Bauschichten entzogen und weitergeleitet. Das kann je nach Temperaturunterschied in beide Richtungen geschehen. „.....Im Winter stellt sich eine Wasserdampfdiffusion in der Regel von der warmen (innen) zur kalten (außen) Seite ein. Bei ausreichend hoher adsorptiver Feuchte auf der Außenseite (> 50 % relative Luftfeuchte) bildet sich ein kapillarer

Wassertransport unabhängig von der Temperatur von feucht (außen) nach trocken (innen) aus, ist also entgegengesetzt gerichtet. In den Wandaufbau integrierte, dampfdichte Wärmedämmstoffe oder Dampfbremsfolien, aber auch Imprägnierungen be- oder verhindern die beschriebenen Transportprozesse.“ [SCHROEDER, 2010, S.270]

Beim **Wasserdampfdiffusionswiderstand** zeigen Holz ($\mu=50$) und Lehm ($\mu = 2$ bis 10) unterschiedliche Eigenschaften. Für Lehm gilt die Regel, dass er umso dampfdichter wird je höher die Rohdichte, bzw. je höher der Tonanteil im Lehm ist. Abb.26 zeigt, dass die Bandbreite des Diffusionswiderstandes von $\mu = 2$ bei Leichtlehm bis zu einem $\mu = 10$ bei Schwerlehm variieren kann.

Auch Holz hat einen feuchtevariablen Diffusionswiderstand, wenn der Werkstoff unbehandelt ist. Durch Zugabe von Bindemitteln, Leimen oder anderen Klebstoffen wird der Holzwerkstoff dichter. In einer umfassenden Untersuchung [POPPER, NIEMZ, EBERLE, 2005, S. 100ff.] wurden die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen von Holzwerkstoffen untersucht und nach EN ISO 12572 bestimmt, und die Kennwerte der gängigsten Holzplattenwerkstoffe aufgelistet (Abb.12). Grob zusammengefasst sieht man einen Anstieg des Diffusionswiderstandes mit einer höheren Rohdichte und einer größeren Plattenstärke. Weitere individuelle Unterschiede sind im Aufbau der Werkstoffe (zb bedingt durch Klebstoffe) festzumachen.

Material	Dampfdruck- gefälle RH %	Normal- Rohdichte ρ_N g/cm ³	Platten- dicke s mm	Wasser- gehalt MC (%)	Diffusions- widerstand μ
Massivholzplatten	100-65	0,45	60	20,1	11
	0-35	0,44	60	8,5	18
	0-65	0,44	60	11,2	24
	100-65	0,47	30	20,2	20
	0-35	0,42	30	7,4	39
	0-65	0,45	30	11,1	43
MDF	100-65	0,77	19	15,9	32
	0-35	0,77	19	6,7	42
MDF, Dachplatte	100-65	0,37	16	11,9	6
	0-35	0,37	16	7,2	6
Faserdämmplatte, Nassverfahren	0-65	0,21	20	6,6	8
	0-35	0,19	20	7,5	5
OSB	100-65	0,67	18	19,0	46
	0-35	0,64	18	6,3	64
	0-65	0,69	18	8,5	91
	0-65	0,65	25	8,6	72
Spanplatten	100-65	0,61	30	17,6	19
	0-35	0,59	30	6,2	23
	0-65	0,60	30	9,0	27
	100-65	0,67	19	17,1	29
	0-35	0,67	19	6,2	38
	0-65	0,67	19	7,9	62
	100-65	0,65	18	14,8	38
	0-35	0,64	18	5,8	43
	0-65	0,65	18	7,8	18
Sperrholz Douglasie, 5-schichtig	100-65	0,53	15	16,7	45
	0-35	0,55	15	5,5	88
	0-65	0,57	15	7,9	91
Buche, 9-schichtig	100-65	0,73	19	17,0	34
	0-35	0,71	19	6,0	51
	0-65	0,72	19	7,9	68
Waldföhre, 9-schichtig	100-65	0,50	21	23,2	21
	0-35	0,49	21	6,8	46
	0-65	0,50	21	9,0	65
Lärche, 9-schichtig	100-65	0,63	22	16,7	33
	0-35	0,63	22	6,4	51
	0-65	0,62	22	8,4	80
Buche, 11-schichtig	0-35	0,75	24	6,1	44
	0-65	0,74	24	8,7	49

Abbildung 11. Diffusionswiderstand ausgewählter Holzwerkstoffe in Abhängigkeit von Dampfdruckgefälle, Rohdichte, Plattendicke und Wassergehalt.

5.2. WÄRMESCHUTZ

Die Rohdichte ist bei beiden Baustoffen von der Art und der Zusammensetzung abhängig. So haben Laubhölzer und Massivlehm ein hohes, bzw. Nadelhölzer und Leichtlehm ein geringes Raumgewicht. Die Rohdichte ist ein wesentlicher Parameter für Wärmeeigenschaften eines Baustoffes, denn je leichter ein Baustoff ist, desto besser ist die Dämmeigenschaft, und je schwerer dieser ist, desto besser ist sein Wärmespeichervermögen. Die Behaglichkeit in einem Raum wird aber nicht durch eine gute Dämmung geschaffen, sondern durch speicherfähige Materialien, die Wärme auch wieder abgeben können. Eine gute Dämmung sollte mit einer noch besseren Speichermasse kombiniert werden.

	Roh- dichte kg/m ³	Wärme- leitzahl λ W/mK	Spezi- fische Wärme ²		Wärme- speicher- zahl ²		Wärme- eindring- zahl b kJ/m ² h ^{0,5} K	Wasserdampf- diffusions- widerstands- zahl ³ μ
			c kJ/kgK	SLL HLL	SLL HLL	i. M.		
Leichtlehm	300 ¹	0,1	1,3	-	400	-	12	2/5
	400 ¹	0,12	1,2	-	500	-	14	
	600	0,17	1,1	1,5	700	900	20	
	800	0,25	1,1	1,4	900	1100	28	3/5
	1000	0,35	1,1	1,3	1100	1300	37	
	1200	0,47	1,0	1,2	1200	1500	45	
Strohlehm	1400	0,59	1,0	1,1	1400		54	5/10
	1600	0,73	1,0		1600		65	
Massivlehm	1800	0,91	1,0		1800		77	
	2000	1,13	1,0		2000		90	
zum Vergleich: ⁴								
Schwerbeton	2400	2,1	1,0		2400		135	70/150
Vollziegel	1800	0,81	1,0		1800		72	5/10
Leichtziegel	800	0,33	1,0		800		31	5/10
Porenbeton	600	0,19	1,0		600		24	5/10
Nadelholz	600	0,13	2,1		1260		24	40
HWL-Platte	400	0,09	2,1		840		17	2/5
Mineralwolle	80	0,04	1,0		80		3	1

1 Leichtlehm einer Rohdichte < 600 kg/m³ ist nur mit fettem Lehm herstellbar

2 SLL = Strohleichtlehm, HLL = Holzleichtlehm. Die spezifische Wärme von mineralischem Leichtlehm ist c = 1,0 kJ/kgK, die Wärmespeicherezahl S entspricht damit der Rohdichte

3 Bei Berechnungen ist der ungünstigste Wert zu verwenden

4 Rechenwerte nach DIN 4108

Abbildung 12: Wärmeschutzwerte und Speichermasse von Lehm und Holz im Vergleich

Die Rohdichte des Lehms kann effektiv dem Holz angepasst werden, je nachdem ob die Lehmschicht besser dämmen oder speichern soll. Die notwendigen Zusatzstoffe, um den Lehm leichter zu machen und um ihm die notwendigen Dämmeigenschaften zu geben, sind Holzspäne. Diese wirken zusätzlich positiv, da der Leichtstoff Holz - durch seine höhere spezifische Wärme im Vergleich zum Beispiel zu Stroh - die Wärmespeicherfähigkeit von Leichtlehm gegenüber dem gebräuchlichen Strohzuschlag sogar noch um das 1,1 bis 1,6 fache des Raumgewichtes erhöhen kann [vgl. VOLHARD, 2013, S. 203 und 205], was bei Lehm

mit einem Raumgewicht von 600 kg einer Wärmespeicherzahl von 900 KJ/m³/K statt 700 KJ/m³/K entsprechen würde. Diese Kennziffer gibt an, wie viel Wärme einwirken muss, damit sich ein Bauteil mit einem m³ um ein Grad Celsius erwärmt.

So steigt die Wärmespeicherfähigkeit von Lehm mit 1200 kg/m³ Raumgewicht von S = 1200 KJ/m³K bei Zuschlägen mit Holzhäckseln zum Beispiel auf S=1500 KJ/m³K - also um das 1,25 fache der ursprünglichen Rohdichte.

5.3. BRANDSCHUTZ

Das Brandverhalten von Nadelholz wird mit der Brandqualifikation D nach EN 13501-1 bewertet, was einem hinnehmbaren Beitrag zum Brand entspricht. Das ändert sich auch bei schichtverleimten Hölzern oder anderen Holzwerkstoffen nicht [s. Abb. 13]

Tabelle 1: Brandverhalten von Bauholz ¹⁾ nach [6]

	Produktdetails	Mindestdichte ³⁾ [kg/m³]	Minimale Gesamtdicke (mm)	Klasse ²⁾ (außer Bodenbeläge)
Bauholz	Visuell und maschinell sortiertes Bauholz mit rechtwinkligem Querschnitt (gesägt, gehobelt oder anders bearbeitet) oder mit rundem Querschnitt	350	22	D-s2, d0

¹⁾ Gilt für alle Sorten, die unter die Produktnormen fallen.

²⁾ Klassen gemäß Tabelle 1 des Anhangs zur Entscheidung 2000/147/EG

³⁾ Gemäß EN 13238.“

Tabelle 2: Brandverhalten von Brettschichtholz nach [7]

Material	Produktdetails	durchschnittliche Mindestdichte [kg/m³]	Mindestgesamtdicke (mm)	Klasse (o. Fußböden)
Brettschichtholz	Brettschichtholzprodukte gemäß EN 14080	380	40	D-s2, d0

Abbildung 13: TEIBINGER. Brandqualifikation von Bau- und Brettschichtholz.

Das Brandverhalten von Lehm ist nicht so eindeutig definiert wie bei Holz, da in der EN 13501-1 Lehm nicht als geprüfter Baustoff aufscheint. Es gibt bei Durchsicht der Literatur zudem schwankende Bewertungen, denn durch unterschiedliche Zuschläge sind Lehmbaustoffe, auch wenn sie die gleiche Rohdichte aufweisen, schwer vergleichbar.

Lehm ab einer Rohdichte von 1700 kg kann durch Erfahrungswerte und verschiedene Versuchsanordnungen als A1, d.h. als nicht brennbar nach der alten DIN 4102 bewertet werden. Das bedeutet, dass ein Bauteil, der mit Lehm (Rohdichte = 1700 kg/m³) vollflächig verputzt ist, als nicht brennbar gelten kann.

Da herrscht, von den Lehmbauregeln bis zu den wichtigsten Verfassern in der Fachliteratur Konsens. Es werden aber auch zum Teil Lehmbaustoffe mit geringerer Rohdichte als nicht brennbar genannt obwohl diese mit „brennbaren“ Zuschlägen wie Holz oder Stroh versehen sind.

Den verwirrenden Überblick über den Stand der Diskussion gibt die nachfolgende Tabelle [Tab 02]:

BRANDVERHALTEN von Lehmbaustoffen	LEHMBAU REGELN 2009 DIN 4102-4: 1970-02 DIN 4102-4: 1994-03 DIN 4102-4 4.11: 1994-03 DIN 18951 Bl.1:1951-01 DIN V 18954: 1956 Diplomarbeiten MFPA Leipzig nach DIN 4102-1	MINKE 2009 DIN 4102-4: 1981 DIN 18951: 1951 DIN 18954 Brandtest TU Braunschweig Brandversuchsanstalt MA 39, Wien SIA-Regeln zum Bauen mit Lehm. Schweiz	RÖHLEN/ ZIEGERT 2010 DIN 4102-4 1994-03 DIN 4102-4 mit CLAYTEC Lehmbauplatten DIN 18550 WTA Merkblatt 8-12-04/D Brandschutz bei Fachwerkgebäuden LEHMBAU REGELN 2009	SCHNEIDER/ SCHWIMANN/ BRUCKNER 1996 DIN 18951 DIN 18951: 1944 DIN 4102 DIN 4102-4: 1981 DIN 4102: 1977 VOLHARD Brandversuche nach DIN 4102	SCHROEDER 2010 DIN 4102-2 DIN 4102-4 1970 DIN 4102-4 1994 DIN V 18954 EN V 13501 EN 1634-1 ab 2010 LEHMBAU REGELN 2009 ZIEGERT Diplomarbeit 1996	VOLHARD 2013 VOLHARD Brandversuche nach DIN 4102, bestätigt von MFPA Leipzig DIN 4102-1: 1998 DIN 18951: 1951
BAUSTOFFKLASSE A1 - nicht brennbar	mineralischer Zuschlag [DIN 4102-4: 1994-03] $\rho \geq 1700$ „lehmbugerechte Beimischungen“ pflanzl. Faserstoffe [DIN 18951 Bl.1:1951-01] Stroh $\rho > 1200$ Holzhackschnitzel $\rho > 1400$ Sägespäne $\rho > 1600$ Sägemehl $\rho > 2000$ [Diplomarbeiten MFPA Leipzig nach DIN 4102-1]	$\rho \geq 1700$ bei Zusatz von pflanzl. Faserstoffen [DIN 18951] Lehmwand massiv $\geq d=25\text{cm}$ [DIN 4102, DIN 18951, Blatt 1/Blatt2, §1, Absatz 3] Lehmwand massiv $\geq d=24\text{cm}$ [DIN 18954]	mineralischer Zuschlag [DIN 4102] $\rho \leq 1700$ „lehmbugerechte Beimischungen“ pflanzl. Faserstoffe [DIN 18951] Strohlehm $\rho > 1200$ [Normgerechte Versuche lt. S.36, LEHMBAU REGELN 2009] Stampflehm gilt als A1 und muss nach LEHMBAU REGELN [DVL. 2008/1]	Lehm $\rho \geq 1800$ [DIN 18951 zurückgezogen, DIN 4102] Lehm $\rho \geq 1700$ [DIN 18952] verdichteter, trockener Lehm $\rho \geq 1600$ mit $d \geq 24\text{cm}$ [DIN 4102: 1977] Lehmbaustoffe mit Gewichtsanteil brennbarer Stoffe $\leq 15\%$ [Seite 220]	Lehm und mineralischer Zuschlag [DIN 4102-4] organischer Zuschlag: Strohhäcksel $\rho > 1200$ Sägemehl $\rho > 2000$ Sägespäne $\rho > 1600$ Holzhackschnitzel $\rho > 1400$	Lehm nicht brennbar [DIN 4102-1: 1998] mineralische Zuschlag-stoffe $\rho \geq 1700$ Verwendung pflanzl. Faserstoffe zur Magerung [DIN 18951: 1951] Stroh $\rho > 1200$ Holzhackschnitzel $\rho > 1400$ Sägespäne $\rho > 1600$ Sägemehl $\rho > 2000$

Angeblich sind bei Versuchen an der MFPA Leipzig nach DIN 4102-1 Leichtlehme ab 1200 kg mit unterschiedlichen Zuschlägen als nicht brennbar nachgewiesen worden. Leider lassen sich diese Ergebnisse aufgrund fehlender Unterlagen nicht verifizieren, sodass hier auf einen Vergleich von VOLHARD zurückgegriffen werden muss, der die Untersuchung tabellarisch zusammengefasst hat. [VOLHARD, 2013, S. 226].

Zuschlag	Erforderliche Rohdichte des Lehmabbaustoffes (kg/m ³)	Klassifizierung
Mineralische Zuschlagstoffe ¹	Keine Anforderung	Nichtbrennbar
»lehmbaugerechte Beimischungen« pflanzlicher Faserstoffe ²	≥1700	Nichtbrennbar
Stroh ³	>1200	Nichtbrennbar
Stroh ³	>600	Schwerentflammbar
Holzhackschnitzel ³	>1400	Nichtbrennbar
Holzhackschnitzel ³	>800	Schwerentflammbar
Sägespäne ³	>1600	Nichtbrennbar
Sägemehl ³	>2000	Nichtbrennbar
Hanf, Flachsschäben ³	>600	Schwer-entflammbar

1 vgl. DIN 4102-4: 1994-03
2 vgl. DIN 18951 Bl.1: 1951-01
3 Nach im Rahmen von Diplomarbeiten an der MFPA Leipzig nach DIN 4102-1 durchgeführten Untersuchungen zur Abschätzung des Brandverhaltens von Lehmabbaustoffen [Ziegert 1996] [Börjesson 1997].

Abbildung 14: VOLHARD. Brandqualifikation von Leichtlehmabbaustoffen nach DIN 4102-1

Zum Brandwiderstand von Lehm gibt es leider keine nachgewiesenen und geprüften Brandversuche. Aus den Experimenten von Volhard lässt sich ableiten, dass eine verputzte Holzriegelwand je nach Putzstärke REI30 oder REI60 leisten kann. Ab einem Raumgewicht von 1200 kg kann auch ein Wandelement einen zusätzlichen Beitrag zur Brandwiderstandsdauer liefern. Entsprechende Brandversuche wären dringend nötig.

5.4. SCHALLSCHUTZ

Für den Holzleichtbau mit seinen dünnen und biegeweichen Gipskartonplatten gibt es verbindliche Prüfergebnisse und eine Vielzahl von Aufbautenkatalogen für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche. Bis heute fehlen solche verbindlichen und geprüften Angaben zum Schallschutz von Lehmabbauteilen. Berücksichtigt man nur das Flächengewicht hätte eine 12 cm starke Holzwand ein R_w von ca 34 dB, während eine 12 cm starke Leichtlehmwand mit 1200 kg/m³ ein R_w von ca. 44 dB aufweisen kann.

Der Umstand, dass Leichtlehm aber auch elastisch ist und Schwingungen dämpfen kann, wird in dieser Berechnung allerdings nicht berücksichtigt. Um das Schalldämmmaß des neuen Holz-Lehm-Verbundsystems zu bewerten, sind Prüfungen unerlässlich.

5.5. DICHTIGKEIT

Der Werkstoff Holz ist luft- und winddicht, das heißt, Undichtigkeiten entstehen nur an den Fugen und Anschlussstellen der einzelnen Holzelemente. Wenn Fugen und Anschlüsse verleimt wären - wie das zum

Beispiel bei stabverleimten Platten der Fall ist - würde das ganze Element als luft- und winddicht gelten. Praxistauglich ist so eine Bauweise freilich nicht. Deswegen übernehmen beim Holzleicht- und beim Holzmassivbau künstlich verklebte Holzwerkstoffe in der Fläche sowie Klebebänder in den Fugen und Anschlüssen die Funktion der Wind- und Luftdichtigkeit.

Eine Ausnahme bildet das Holz100 System von Thoma [THOMA, 2006, Kap.8] [FERK, REITERER, 2002], das gänzlich ohne verleimte Bauteile auskommt. Diese Elemente werden kreuzweise und diagonal gelegt und mit trockenen Holzdübeln verbunden. Erstaunlicherweise ist das 5-schichtige, leimfreie Element in einer Untersuchung nach ÖNORM B 5300 mit der Beanspruchungsklasse 4 nachgewiesen worden [FERK, 2002,]. Soweit der theoretische Ansatz, denn in der Praxis wird eine zusätzliche winddichte Ebene mit Holzweichfaserplatte hinzugefügt, da in die Fugen eintretende kühle Luft den U – Wert des gesamten Holz100 Bauteiles verschlechtern würde.

Das Verhalten von Lehm in Bezug auf Luft- und Winddichtigkeit ist abhängig von seinem Raumgewicht und seiner Dichte. In der einschlägigen Lehmfachliteratur gibt es weitgehend Konsens darüber, dass ein Lehm mit einer Rohdichte von mind. 900 kg/m^3 als wind- und luftdicht gelten kann (s. Tab. xx)

WIND- DICHTIGKEIT LUFT- DICHTIGKEIT	LEHMBAU REGELN 2009	SCHNEIDER, SCHWIMMEN, BRUCKNER 1996	RÖHLEN ZIEGERT 2010	SCHROEDER 2010	VOLHARD 2013
	$\rho \geq 900 \text{ kg/m}^3$ bzw. einseitiger Putz	$\rho \geq 900 \text{ kg/m}^3$	$\rho \geq 900 \text{ kg/m}^3$ Lehmnputze $\rho \geq 1400 \text{ kg/m}^3$	$\rho \geq 900 \text{ kg/m}^3$ bzw. einseitiger Putz Innenschale aus Leichtlehm d= 5-10cm	$\rho \geq 900 \text{ kg/m}^3$ bzw. einseitiger Putz

Tab 03: WINDDICHTIGKEIT von Lehmstoffen in Abhängigkeit der Rohdichte ρ [kg/m³]

5.6. Abschirmung gegen Strahlung

Die Abschirmung hochfrequenter Strahlung wurde im Jahre 2000 am Institut für HF-, Mikrowellen und Radartechnik der Universität der Bundeswehr in München von Pauli und Moldan [PAULI, MOLDAN, 2000] im Vergleich verschiedener Aufbauten, insbesondere im Zusammenhang mit Lehm, untersucht und beschrieben. Eine 24 cm dicke Lehmwand mit einer Rohdichte von 1200 kg/m^3 kann je nach Frequenz der Strahlung eine Dämpfung von 20 – 50 db bewirken, und je schwerer und dichter der Lehm, desto besser ist das Abschirmungsverhalten [vgl. SCHROEDER, 2010, S. 286].

6. HOLZ-LEHM-VERBUNDSYSTEM

6.1. GRUNDSATZ

Das neue Holz-Lehm-Verbundsystem (Idee, Konzeption und Copyright Mag. Andreas Breuss MSc.) ist folglich ein Hybrid aus einer Leicht- mit einer Massivbauweise, wobei jeweils die Stärken der einzelnen Systeme genutzt und neu kombiniert werden. Holz trägt. Lehm schützt. Das ist der einfache Grundgedanke. Die innen liegende Tragstruktur aus massivem Holz hat eine große Flexibilität im Tragwerk und in den Wärmedämmeigenschaften. Es ist ein ausgereiftes und erprobtes System, das ohne Holzwerkstoffe auskommt, und nur mit unbehandelten natürlichen Materialien hergestellt wird. Das ist ein Vorteil gegenüber der Holzmassivbauweise. Ein anderer ist, dass eine Holzrahmenkonstruktion ressourcenschonender ist, weil der Holzverbrauch deutlich geringer ist.

Dieses bewährte System wird mit einer neuen massiven Schale innen und außen verbunden. Man erhöht damit einerseits die Speichermasse und andererseits soll diese die komplizierten und energieaufwändigen Schichten ersetzen.

Materialien für das neue Holz-Lehm-Verbundsystem sind Holz, Flachs und Lehm.

Es werden keinerlei künstliche Baustoffe benötigt, sondern in unterschiedlichen natürlichen Zusammensetzungen können diese drei Grundmaterialien alle Funktionen übernehmen.

Ein Hybrid zwischen einer Leicht- und Massivbauweise muss natürlich das Ziel der maximalen Vorfertigung haben, um - ähnlich dem klassischen Holzrahmenbau - fertige Wand- und Deckenmodule herstellen zu können. Somit ist die Bauzeit auch mit diesem zu vergleichen.

Im Folgenden werden der Aufbau und die Anforderungen an dieses System beschrieben.

6.2. STATISCH WIRKSAME BEPLANKUNG UND LUFTDICHTIGKEIT

Üblicherweise werden im Rahmenbau für die horizontale Aussteifung OSB Platten oder Diagonalschalungen verwendet, die entweder innen oder außen angebracht werden können. Aus bauphysikalischen Gründen werden sie jedoch heute meistens innen montiert, da die Beplankung, neben der statisch wirksamen Aussteifung, auch bauphysikalische Funktionen der Luftdichtheit und Dampfbremse übernehmen kann. Der Nachteil ist allerdings, dass auf diese innere Schicht eine Vorsatzschale aufgebracht werden muss, da die luftdichte Ebene nicht mit Installationseinheiten durchstoßen werden soll.

Da der Dampfdiffusionswiderstand nach außen hin abnehmen muss, ist die Anbringung der Dampfbremse raumseitig notwendig. Es können dafür Werkstoffe verwendet werden, die statisch wirksam sind, aber in der Regel einen höheren Dampfdiffusionswiderstand haben (zB OSB Platten). Der Nachteil der innen liegenden Aussteifung mit einer Holzwerkstoffplatte ist allerdings, dass nur die Fläche in den Wänden luftdicht ist, und alle Übergänge von Wand zu Decke extra luftdicht angeschlossen werden müssen. [vgl. KOLB, 2010, S. 68 ff.]

Das Risiko für Fehler in der Ausführung ist groß, wobei folgende Ursachen verantwortlich sein können:

1. Verwendung von nicht sachgerechten Klebebändern.
2. Klebeflächen werden nicht ausreichend gesäubert. Auf Baustellen ist das mitunter schwierig zu leisten, weil die Staubbelastung kontinuierlich und groß ist.
3. Unsachgemäßes und schlampiges Verlegen der Bänder.

4. Komplizierte Anschlussstellen, die geometrisch in Wirklichkeit nicht abzukleben sind, ein Risiko, das mit einer guten Planung minimiert werden kann.
5. Vorortentscheidungen auf der Baustelle, die gegenüber der Planung Veränderungen vornehmen.

In einer vergleichenden Analyse bewertet KOLB unterschiedliche Varianten innen liegender statisch wirksamer Beplankungen.

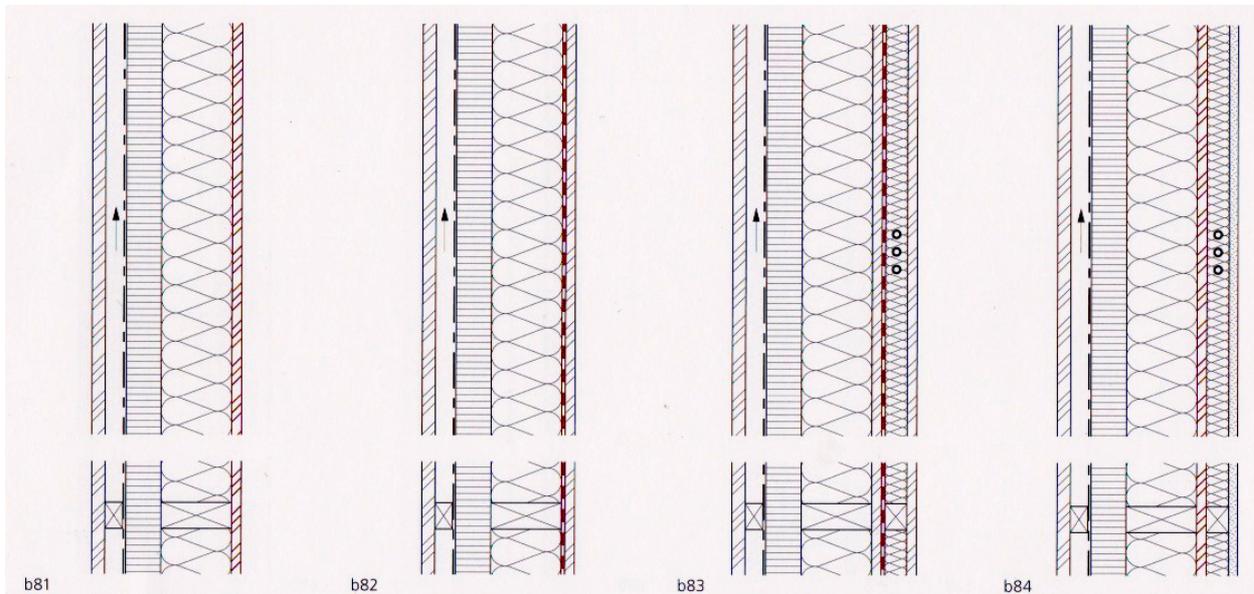


Abbildung 15 / b81 bis b84

In Abb.15/b81 ist die innere, einschichtige Beplankung gleichzeitig statisch und bauphysikalisch wirksam. Das können im Wesentlichen nur Holzwerkstoffe wie etwa OSB- oder Dreischichtplatten erfüllen. In Abb.15/b82 übernimmt eine Folie innen die Luftdichtigkeit und Dampfbremse, während eine zusätzliche Beplankung darüber statisch wirksam ist. Abb.15/b83 zeigt einen zweischichtigen Aufbau, wobei die innere Beplankung nur für die konstruktiv erforderliche Aussteifung zuständig ist und in diesem Fall auch mit einer Bretterschalung ausgeführt werden kann, während die bauphysikalischen Funktionen separat von einer innen liegenden Folie übernommen werden. Um Durchdringungen zu vermeiden, wird eine zusätzliche Installationsebene angebracht. Die Trennung der Funktionen – Statik, Bauphysik, Installationen – ist laut KOLB [vgl. KOLB, 2010; S. 70 ff] die optimale Variante.

Wenn man die Anschlüsse Wand und Decke zusätzlich betrachtet, wäre die bauphysikalisch beste Variante, dass die luftdichte Ebene innen durchgeht, und die Decke auf der inneren, tragend ausgebildeten Beplankung liegt. Da gäbe es keine Durchdringungen und keine komplizierten Anschlüsse, die verklebt werden müssen (s. Abb.16/b88), wofür aber eine Holzwerkstoffplatte verwendet werden müsste.

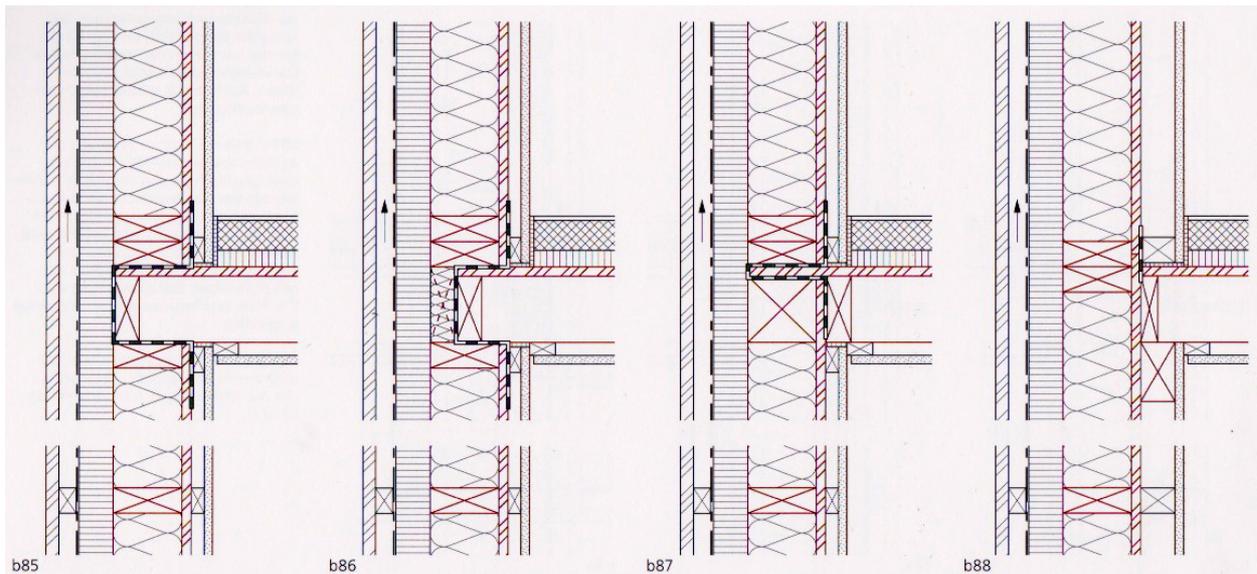


Abbildung 16 / b85 bis b88

Wenn jedoch die Decke auf der Ständerkonstruktion direkt aufliegt, ist Abb16/b86 der optimale Fall, da zusätzlich die Stirnseite der Decke überdämmt ist. „...Die Luftdichtigkeitsschicht und die Dampfbremse umfassen den Deckenanschluss fugenlos. Weil eine Außendämmung vorliegt, kann die Luftdichtigkeitsschicht und Dampfbremse um das Tragwerk geführt werden. Für den Anschluss wird eine Folie mit variablem Diffusionswiderstand empfohlen.“ [KOLB, 2010, S. 72].

Zusammenfassend könnte die „beste“ Variante nach KOLB wie folgt beschrieben werden: Statisch wirksame Beplankung sowie Luftdichtigkeit und Dampfbremse sollen getrennt in unterschiedlichen Schichten aufgebaut werden. Die aussteifende Schale soll innen angebracht sein, und kann bei Trennung der Funktionen auch mit einer Diagonalschalung ausgeführt werden. Der Einsatz von Holzwerkstoffplatten kann dadurch entfallen. Die luftdichte Schicht soll fugenlos über den Deckenrand in die Ebene der darüberliegenden Wandkonstruktion übergehen. Eine zusätzliche Überdämmung außen ist dazu erforderlich, weil sonst die Luftdichtheitsebene mit dem Kaltbereich in Berührung kommen würde.

6.3. HOLZKONSTRUKTION

Die Dimension der Holzständerkonstruktion ist abhängig von der Geschosshöhe, der Nutzlast und den Spannweiten der Deckenelemente. Sie ist im Holzrahmenbau individuell an die jeweiligen Anforderungen anpassbar und daher im Zusammenhang mit dem Holz-Lehm-Verbundsystem das passende Konstruktionsprinzip, um den Anspruch der Flexibilität sowie die Anpassung an individuelle Bedürfnisse erfüllen zu können.

Der Regelaufbau einer Holzständerkonstruktion sind Steher mit den jeweils erforderlichen Dimensionen (zB 6x12 oder 6x14 bzw. 6x18 etc.), die mit Schwellen und allenfalls nötigen Riegeln zu Elementen vorgefertigt werden. Verwendetes Material ist leimfreies Konstruktionsvollholz in Fichte.

An der Innenseite wird eine Diagonalschalung angebracht, die auf die Ständerkonstruktion aufgenagelt wird. Durch die nötige Überlappung für die Vernagelung müssen die Ständer jeweils am Stoß mind. 4 cm stärker ausgebildet sein. (s. Abb. 17)

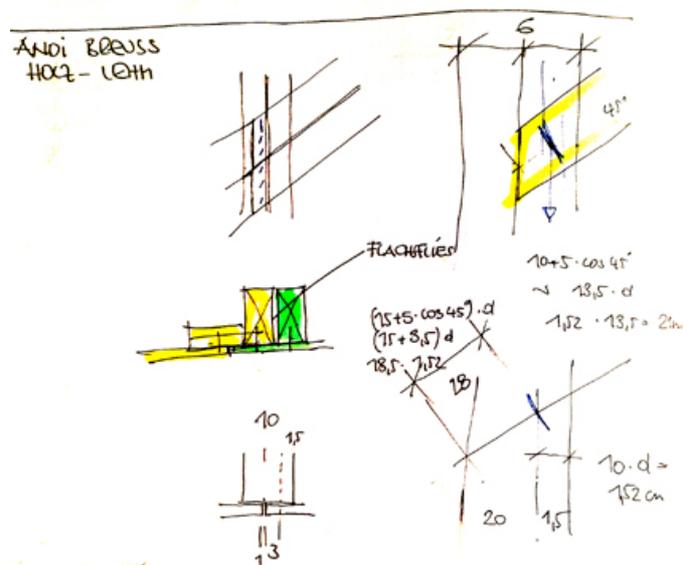


Abbildung 17. Die Überlappung muss mind. 3.5 cm betragen um eine kraftschlüssige Vernagelung zu gewährleisten [POCK].

6.4. MATERIALIEN IM SCHICHTENAUFBAU

Von innen nach außen betrachtet ergibt ein in der Regel ausgeführter Holzrahmenbau eine Abfolge von notwendigen Schichten, wobei die innere, dem Raum zugewandte, meist aus Gipskartonplatten besteht. Diese stellen neben der Raumbofläche auch die Beplankung einer Installationsebene dar und sind an Holzstaffeln oder Metallständerprofilen befestigt.

Wenn man der Empfehlung von KOLB folgt, dass die innere Verschalung hinter der Installationsebene die Aussteifung übernimmt und es besser ist, die Luftdichtigkeit sowie Dampfbremse von dieser unabhängig anzubringen, kommt im konventionellen Holzrahmenbau innen auf die Schalung zusätzlich eine Folie oder ein Papier, das oben genannte Funktionen übernehmen kann.

In der Ebene der Holzständerkonstruktion wird die Wärmedämmung aufgebracht, die standardmäßig aus Mineralwolle besteht. Außerhalb der Holzkonstruktion muss eine weitere Dämmebene befestigt werden, die die Rahmenkonstruktion und die Deckenanschlüsse überdämmt. Die Dämmplatten können bereits die Funktion der Winddichtigkeit übernehmen - wenn zB bituminierte Holzwolleleichtbauplatten bei einer hinterlüfteten Holzfassade verwendet werden - und die Winddichtigkeit wird durch das Anbringen von winddichten Folien erzielt.

Im diesem einfachen Regelfall sind - die Holzfassade nicht mitgezählt - mindestens sieben Schichten unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzung notwendig, die zudem an den Anschlussstellen noch verklebt werden müssen.

Wenn man die eingesetzten Werkstoffe selbst genauer betrachtet, bestehen diese wiederum aus mehreren zusammengesetzten stofflichen Schichten. Betrachtet man zB eine Ökodampfbremse aus Papier, erkennt

man folgenden Aufbau: Polyethylenfilm, Zellulosevlies, eingelegtes Gewebe aus Polypropylen und Polyethylen, Zellulosevlies, Polythylenfilm.

Eine Auflistung der Inhaltsstoffe von Produkten, die im herkömmlichen Holzrahmenbau verwendet werden, ergibt, wenn man nur das auflistet, was die Hersteller bekanntgeben – bei Anfragen nach der Produktzusammensetzung zeigen sich die Herstellerfirmen nicht sehr auskunftswillig – eine lange Liste von künstlich hergestellten Ingredienzen: Polyurethan (PU), Polypropylen (PP), Additive zur Erhöhung der Porenstruktur, PVC, PUR – Bindemittel, polymeres Diphenylmethandiisocyanat (PMDI Leime), Polyharnstoffverbindungen, Paraffinwachsemulsion, Holzspäne, Wasser, Zellulose, Glasseidengelege, Polypropylengelege, Polyethylengelege, Polyolefine, Polyethylen, Copolymere, Polymerbitumen, Acrylate, PET, Polyester (PES), Aluminium, Glas, Sodaasche, Bakelit, Mineralöl, Magnesium, Kunstharz und vieles mehr.

Die Zielsetzung des neuen Holz-Lehm-Verbundsystems ist, diese Vielfalt an Inhaltsstoffen auf zwei bis drei Stoffe zu reduzieren, was einen weitgehenden Verzicht von Holzwerkstoffen und künstlichen Baustoffen nach sich ziehen muss.

Die stoffliche Zusammensetzung des Holz-Lehm-Verbundsystemes besteht aus: Holz, Lehm, Flachs.

Dabei übernimmt der Lehm, durch unterschiedliche Zusammensetzung der Rohdichte, die Funktion der einzelnen bauphysikalisch benötigten Schichten.

Wird der Lehm schwerer, übernimmt er Schallschutz und Wärmespeicherung, wird er leichter, übernimmt er Dämmfunktionen. Wind- und Luftdichtigkeit lassen sich einstofflich mit Lehm herstellen. Klebebänder, die Anschlüsse und Fugen abdichten, werden durch Lehmschlämme und ein Vlies aus Flachs ersetzt. Zuschlagstoffe im Lehm sind ausschließlich Holzprodukte wie Sägespäne oder Hackschnitzel.

6.5. AUFBAU DES HOLZ-LEHM-VERBUNDELEMENTES

Der Aufbau des Holz-Lehm-Verbundelements geht von einer Kernschicht aus, die eine klassische tragende Holzständerkonstruktion mit einer dazwischen liegenden Dämmung darstellt. Diese kann je nach statischer Belastung angepasst werden. Außen wird eine Leichtlehmschicht aufgebracht, die zusätzliche Wärmedämmfunktionen übernimmt und die winddichte Ebene darstellen soll. Auf die horizontal aussteifende Diagonal-Vollholzschalung wird ein Lehminelement aufgebracht, das Luftdichtigkeit, Dampfbremse, Schall- und Brandschutz, Leitungsführung und raumregulierende Funktion übernehmen kann.

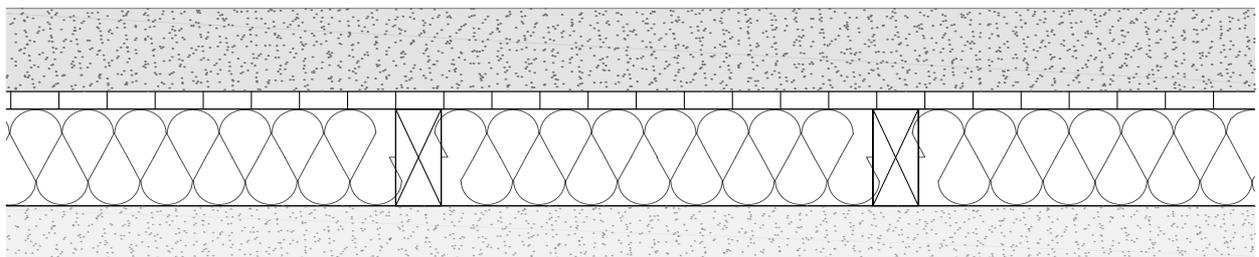


Abbildung 18

Grundaufbau des Holz Lehm Verbundelementes. Leichtlehm, Holzkonstruktion mit Holzfaserdämmung, Vollholzschalung, Schwerlehm

Die Dämm- und Konstruktionsebene im Kern wird für einen Flachbau – zum Beispiel Reihenhaus mit einem Geschoss über EG - mit 14 cm angenommen und mit einem Leichtlehmelement überdämmt. Leichtlehm, der mit Stroh-, Holz- oder mineralische Stoffen zugeschlagen wird, hat abhängig vom Raumgewicht unterschiedlich gute λ – Werte. Um das Ziel der Gleichstofflichkeit zu erreichen, wird Holz als Zuschlag verwendet um die Rohdichte des Lehms zu ändern. Was liegt näher, als Säge- und Hackreste, die im Holzbaubetrieb anfallen, zu verwenden? Diese Zusätze verbessern zudem die Zugfestigkeit des Lehmes und verändern je nach Zusammensetzung die Rohdichte, den Wärmeleitwert, das Sorptions- und das Wärmespeichervermögen. Leichtlehm mit einem Raumgewicht von 300 kg/m^3 ergibt nach DIN 4108 ein $\lambda=0,1$, während eine Erhöhung der Rohdichte auf 600 kg/m^3 ein $\lambda = 0,17$ ergeben würde.

	Rohdichte kg/m^3	Wärmeleitzahl	Spezifische Wärme ²		Wärmespeicherzahl ²		Wärmeeindringzahl	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ³
		λ	c		S		b	μ
		W/mK	SLL	HLL	SLL	HLL	i. M.	-
Leichtlehm	300 ¹	0,1	1,3	-	400	-	12	2/5
	400 ¹	0,12	1,2	-	500	-	14	
	600	0,17	1,1	1,5	700	900	20	
	800	0,25	1,1	1,4	900	1100	28	3/5
	1000	0,35	1,1	1,3	1100	1300	37	
	1200	0,47	1,0	1,2	1200	1500	45	
Strohlehm	1400	0,59	1,0	1,1	1400	-	54	5/10
	1600	0,73	1,0	-	1600	-	65	
Massivlehm	1800	0,91	1,0	-	1800	-	77	
	2000	1,13	1,0	-	2000	-	90	
zum Vergleich: ⁴								
Schwerbeton	2400	2,1	1,0	-	2400	-	135	70/150
Vollziegel	1800	0,81	1,0	-	1800	-	72	5/10
Leichtziegel	800	0,33	1,0	-	800	-	31	5/10
Porenbeton	600	0,19	1,0	-	600	-	24	5/10
Nadelholz	600	0,13	2,1	-	1260	-	24	40
HWL-Platte	400	0,09	2,1	-	840	-	17	2/5
Mineralwolle	80	0,04	1,0	-	80	-	3	1

1 Leichtlehm einer Rohdichte < 600 kg/m³ ist nur mit fettem Lehm herstellbar

2 SLL = Strohleichtlehm, HLL = Holzeichtlehm. Die spezifische Wärme von mineralischem Leichtlehm ist c = 1,0 kJ/kgK, die Wärmespeicherzahl S entspricht damit der Rohdichte

3 Bei Berechnungen ist der ungünstigste Wert zu verwenden

4 Rechenwerte nach DIN 4108

Abbildung 19

Tabelle mit bauphysikalischen Werten bei unterschiedlichen Lehmzusammensetzungen im Vergleich zu herkömmlichen Baustoffen.

VOLHARD beschäftigt sich schon seit den 80er Jahren mit Holz und Leichtlehm, sein Standardwerk – Bauen mit Leichtlehm – ist bereits in seiner 7. Auflage erschienen. Der große Wert dieses Buches liegt unter anderem in einer übersichtlichen Zusammenstellung von Kennwerten für Lehm. Die Tabelle von VOLHARD (s. Abb.19) gibt einen Überblick, wie sich die bauphysikalischen Kennwerte in Abhängigkeit zur Rohdichte verändern und vergleicht diese mit herkömmlichen Baustoffen.

Diese Werte stellen die Basis für alle nachstehenden bauphysikalischen Berechnungen im Zusammenhang mit dem Holz-Lehm-Verbundelement dar.

Für die innere Schale wird eine Rohdichte von 1200 kg/m^3 angenommen, und wird durch folgende Parameter begründet.

Dieses Element wird im Folgenden als Lehm1200 bezeichnet.

1. Die Wärmespeicherzahl (S) bei Lehm1200 und Nadelholz ist gleich, und kann durch Zuschläge von Holz sogar noch verbessert werden.
2. Die Luftdichtheit ist bei Lehm1200 auf alle Fälle gewährleistet. Ab 900 kg/m^3 gilt laut Lehmbauregeln [vgl. DACHVERBAND Lehm] und der gängigen Fachliteratur [vgl. zb. MINKE; VOLHARD; SCHROEDER; RÖHLEN u.a.] ohne Nachweis die Luft- oder Winddichtheit als gesichert. Zudem sind auch Lehmelemente mit einer Rohdichte ab 300 kg/m^3 mit einem einlagigen Putz von mind. 15 mm luft- und winddicht.
3. Bis 1200 kg hat Lehm einen Dampfdiffusionswiderstand von $\mu = 3$ bis 5. Ab 1400 kg steigt dieser Wert auf $\mu = 5$ bis 10.
4. Bei einer Untersuchung der MFPA in Leipzig konnten Leichtlehme ab 1200 kg/m^3 je nach Zuschlag als nicht brennbar eingestuft werden, aber hier wäre ein empirischer Nachweis dringend erforderlich. Die erwähnte Untersuchung [vgl. VOLHARD, 2013, S 226] war leider nicht erhältlich, und kann daher nur theoretisch als Hypothese angenommen werden.
5. Lehm mit 10 cm Stärke und einem Raumgewicht von 1200 kg/m^3 erreicht als solitäres Bauteil schon ein $R_w = 44 \text{ dB}$ [vgl. VOLHARD, 2013, S. 230]. Für die Fa Claytec wurde von RÖHLEN / ZIEGERT ein Aufbau mit einer Lehmschüttung mit 1200 kg und Lehmbauplatten untersucht und geprüft. Eine Deckenfüllung mit 12 cm Stärke, einem Hohlraum von 8 cm und einer 2,5 cm starken Lehmbauplatte erreicht ein $R_w > 54 \text{ dB}$. Wenn man die Lehmbauplatte weglässt, wird immer noch ein $R_w < 47 \text{ dB}$ erreicht [vgl. RÖHLEN, 2010, S. 256]. Ein positiver Einfluss von Lehm1200 auf den Schallschutz kann also angenommen werden.

Der Aufbau des zu untersuchenden Holz-Lehm-Verbundelementes wird wie folgt definiert:

Lehm1200 innen, Stärke noch offen,

Holzständerkonstruktion Fichte Vollholz 6x14 cm dazw

Holzfaserdämmstoff (zb SteicoFlex) 14 cm,

Lehm300 bis Lehm600 als Wärmedämmung außen, Stärke noch offen.

6.5.1. WÄRMESCHUTZ

	Wärme- leitwert	Stärke in cm						
Lehm 1200	$\lambda=0,47$	12	10	12	12	12	12	12
Holzfaserdämmung 20 % Holzanteil	$\lambda=0,042$	14	14	16	18	14	16	18
Lehm 600	$\lambda=0,17$	8	8	8	8			
Lehm 300	$\lambda=0,1$					8	8	8
U Wert W/m ² K		0,29	0,30	0,27	0,24	0,25	0,23	0,21

Tab. 4: Verhältnis von U – Werten zu Raumgewicht und Schichtstärke

Der Wärmeschutz wird in erster Linie durch die Zwischendämmung in Holzfaser bestimmt, und kann dort gesteuert werden. Die äußere Lehmschale verbessert je nach Raumgewicht den Gesamtwert.

6.5.2. WÄRMESPEICHERKAPAZITÄT

Während die Zusammensetzung des äußeren Lehmelementes den Wärmeschutz bestimmt, wird das innere Element Lehm1200 durch die Wärmespeicherkapazität bestimmt:

<i>Stärke Lehm1200</i>	5	6	8	10	12	14	16
Speichermasse m_{wbA} (kg/m ²) ohne Putz	79,2	84,9	91,9	93,8	92,8	90,5	< 90
Speichermasse m_{wbA} (kg/m ²) mit Lehmputz Innen (1700 kg/m ³)	106,5	109,8	112,5	111,5	108,9	106,1	< 105

Tab. 5: Speichermassenberechnung des gesamten Bauteiles ohne und mit Putz. (s. Tab. 5 fett)

In einer Berechnungsreihe des gesamten Holz-Lehm-Verbundsystems in ein bis zwei cm Schritten von 5 bis 16 cm zeigt sich bei 10 cm ein Höchstwert, der ab 12 cm interessanterweise wieder abfällt. Grund dürfte sein, dass auch die Holzfaserdämmstoffe eine gute Wärmespeicherkapazität haben, und diese abnimmt, je mehr der Abstand der Holzfaserdämmung von der inneren Lehmoberfläche zunimmt.

Mit einem Lehmputz innen lässt sich die Speicherkapazität nochmals stark verbessern. (s. Tab. 5)

Wenn man nur das innere Element Lehm1200 ohne die gedämmte Rahmenkonstruktion untersucht, findet man den entsprechenden Beweis (s. Tab. 6) Es ist bei diesem Vergleich auch ersichtlich, wie bedeutend die Holzfaserdämmung für die Wärmespeicherkapazität ist. Die Entscheidung für diesen Dämmstoff ist also nicht nur in Bezug auf Einstofflichkeit, sondern auch bauphysikalisch sinnvoll.

<i>Nur Lehm1200 Stärke in cm ohne Wandaufbau</i>	5	6	8	10	12	14
Speichermasse m_{wbA} (kg/m ²)	28,6	34,3	45,5	56,38	66,5	75,6

Tab. 6: Vergleich der wirksamen Speichermasse bei solitärer Betrachtung des inneren Elements Lehm1200 ohne Wandaufbau

Während das innere Element Lehm1200 solitär betrachtet bei 12 cm Stärke ein m_{wbA} von 66,5 kg/m² hat, weist das ganze Holz-Lehm-Verbundelement mit 14 cm Holzfaserdämmung zwischen der Holzkonstruktion ein m_{wbA} von 92,8 kg/m² auf.

Eine Erhöhung des Raumgewichtes der äußeren Leichtlehmschale hat dagegen keinen signifikanten Einfluss mehr auf die gesamte Speichermasse des Bauteiles, würde jedoch den Wärmeschutz negativ beeinflussen.

<i>Aufbau mit Lehmelement außen Raumgewicht in kg/m³</i>	300	600	900*	300	600	900*
Holzfaserdämmung in cm	14	14	14	16	16	16
Speichermasse m_{wbA} (kg/m ²)	92,8	92,9	93,1	92,6	92,7	93,1

Tab. 7: Vergleich der wirksamen Speichermasse durch Veränderung der äußeren Lehmschicht.

* Lehm900 außen bewirkt Kondensat im Bauteil.

Folgender Aufbau des Holz-Lehm-Verbundelementes wird zur weiteren Untersuchung herangezogen:

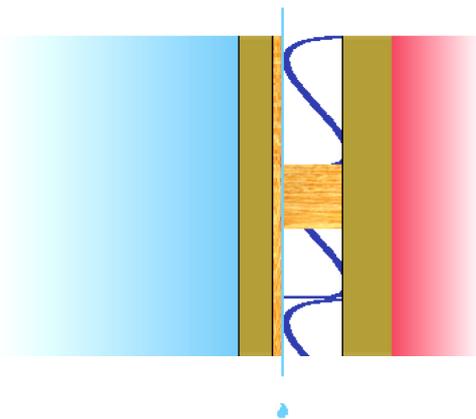
	Stärke in cm	Wärmeleitwert	U - Wert
Lehm 1200	12	$\lambda=0,47$	
Schalung Fichte GH 12	2,5	$\lambda=0,12$	
Holzfaserdämmung	14	$\lambda=0,042$	
20 % Vollholzbalken Fichte GH 12		$\lambda=0,12$	
Lehm 300	8	$\lambda=0,1$	
			0,25 W/m²K

Tab. 8: Wandaufbau des Holz-Lehm-Verbundelementes

Eine Verschalung außen ist aus bauphysikalischer Sicht nicht sinnvoll, da die bauphysikalische Berechnung nach Glaser Gefahr von Tauwasser im Bauteilquerschnitt ergibt. Auch wenn bei einer Berechnung mit Wufi möglicherweise andere Ergebnisse herauskommen, ist die innere Vollholzschalung als Tragstruktur für das schwere Lehmelement erforderlich.

AUSSEN

INNEN



Im nebenstehenden Bauteilbild werden nur die in der Tauwasserberechnung verwendeten Schichten dargestellt.

Diese Tauwasserberechnung nach ÖNORM B 8110-2 wurde für eine Konstruktion mit inhomogenen Schichten durchgeführt. Für die Berechnung wurden die inhomogenen Schichten durch homogene Schichten ersetzt. Für die Erstellung der homogenen Schichten wurde der flächenmäßig größte Baustoff der inhomogenen Schicht gewählt.

Bezeichnung	Dicke [m]	lambda [W/(mK)]	mue [-]	sd [m]	R [m ² K/W]
<input checked="" type="checkbox"/> 2) Leichtlehm 300	0,080	0,100	5,00	0,40	0,80
<input checked="" type="checkbox"/> 1) Schalung Fichte GH 12	0,025	0,120	50,00	1,25	0,21
<input checked="" type="checkbox"/> 1) Ersatz für Inhomogene-Schicht STEICO Flex 042	0,140	0,042	1,00	0,14	-
<input checked="" type="checkbox"/> 2) Lehm 1200	0,120	0,470	5,00	0,60	0,26

wird in der Tauwasserberechnung berücksichtigt

1) Diese Baustoffe stammen aus dem benutzereigenen Baustoffkatalog!

2) Für diese Baustoffe wurden die ECOTECH-Baustoffdaten vom Benutzer individuell abgeändert!

Wärmeübergangswiderstand Außen: 0,04 m²K/W

Wärmeübergangswiderstand Innen: 0,25 m²K/W

Berechnet mit ECOTECH Software, Version 3.3. Ein Produkt der BuildDesk Österreich GmbH; Snr: ECT-20101213XXXH957266

Abbildung 20. Tauwasserberechnung nach Önorm B 8110-2 ergibt Tauwasserbefall im Inneren der äußeren Verschalung. * berechnet TB Leiler, Wien

6.5.3. LUFTDICHTIGKEIT UND DAMPFBREMSE

Das innere Element Lehm1200 erfüllt beide Funktionen.

Lehm ist als Baustoff dampfdiffusionsoffen, Lehm1200 hat ein $s_d(m)$ von 0,60, der außen liegende Lehm300 mit $s_d(m)$ von 0,40. Die Abnahme des Dampfdiffusionswiderstandes von innen nach außen ist mit diesem Aufbau also gewährleistet.

Die Luftdichtigkeit von Lehm ist ab einem Raumgewicht von 900 kg/m^3 nach den deutschen Lehmbauregeln als gesichert anzunehmen (s. Kap. 5.5., S. 24). Das betrifft nur die Fläche des Bauteiles, die Anschlüsse und Stöße werden später gesondert beschrieben.

6.5.4. WINDDICHTIGKEIT

Auch die Winddichtigkeit würde für ein Bauteil mit einem Raumgewicht von 900 kg ohne weiteren Nachweis als gesichert gelten (s. Kap. 5.5., S. 24).

Lehm600 und Lehm300 scheinen in der gängigen Fachliteratur dagegen nicht als winddicht auf. Für diese lockere Dichte sind zusätzliche Ebenen nötig, wie zB. ein einlagiger Lehmputz mit einer Stärke von 15 mm, der ein Armierungsgewebe aus Glasfaser oder auch aus Flachs mit eingelegt hat. Wenn ein Gebäude aus architektonischen Gründen außen vollflächig verputzt werden soll, ist die Frage der Winddichtigkeit damit beantwortet.

Anders liegt der Fall, wenn außen eine hinterlüftete Holzfassade angebracht werden soll. Dann muss die äußere Lehmschicht diese Funktion übernehmen können. Lehm300 und Lehm600 sind dafür nicht dicht genug, deshalb muss eine zusätzliche Schicht angebracht werden. Am einfachsten wäre ein Windpapier als äußerste Schicht unter der Außenverkleidung zu verwenden. VOLHARD gibt aber in seinem Standardwerk „Bauen mit Leichtlehm“ an, dass ein „...einfacher Lehmverstrich den Zweck besser erfüllt als ein Windpapier...“ [vgl. VOLHARD, 2013, S. 164]. Dieser Lehmverstrich wird bereits werkseitig aufgebracht, und macht das Element in der Fläche winddicht. Die Anschlussfugen bedürfen einer speziellen Behandlung und werden im Kap 8.6.2. gesondert beschrieben. Dieser Lehmverstrich, dessen Zusammensetzung bei VOLHARD nicht genauer spezifiziert ist, wurde in einem seiner Projekte im Jahre 1983 [vgl. VOLHARD, 2013, S. 238] bereits ausgeführt. Es gibt also einen Langzeitversuch, der belegt, dass ein einfacher Lehmverstrich bereits winddicht sein kann.

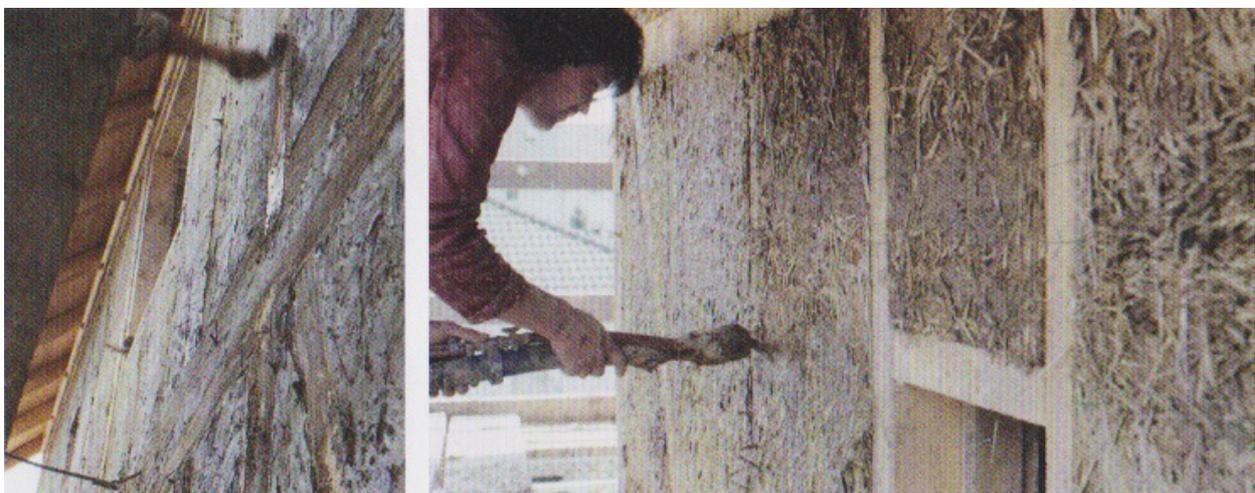


Abbildung 21. Links: Lehmverstrich mit einem Pinsel aufgetragen. Rechts: Lehmverstrich maschinell aufgetragen.

Lehm300 bis Lehm600 sind ohne weitere Behandlung also nicht winddicht. Ein zusätzlicher Lehmverstrich übernimmt diese Funktion und muss eventuell mit einem Flachsvlies armiert sein. Auch hier wäre eine zusätzliche Prüfung notwendig.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der einstoffliche Lehmaufbau im Holz-Lehm-Verbundelement die im Holzrahmenbau benötigten bauphysikalischen Funktionen übernehmen und deren Anforderungen erfüllen kann.

6.5.5. RAUMKLIMA

Die Verbesserung des Raumklimas wird durch das massive Innenelement bewirkt. Dieses regelt in erster Linie die Luftfeuchtigkeit im Raum und hält diese konstant bei verträglichen 40 bis 60%. In diesem Schwankungsbereich bei einer Raumtemperatur von 20 Grad spricht man von einem gesunden Raumklima, das unter anderem auch dazu beitragen kann, die Anfälligkeit für Infektionskrankheiten und Allergien zu verringern.

Weiters wird die Raumluft durch die Verwendung chemiefreier Produkte von VOCs, Formaldehyd, Isocyanaten und anderen für den Menschen schwer verträglichen Emissionen reingehalten.

Die hohe Wärmespeicherfähigkeit von Lehm1200, aber auch die Abgabe in Form von Strahlungswärme führt zu einer höheren Behaglichkeit für den Nutzer.

Wissenschaftlich erwiesen (s. Kap. 5.6.) ist zudem, dass Lehm elektromagnetische Immissionen verringern kann.

Damit kann auch die raumklimatische und ökologische Überlegenheit des Holz-Lehm-Verbundelement im Vergleich zur herkömmlichen Holzrahmenkonstruktion angenommen werden.

6.5.6. BRANDSCHUTZ

Was den Brandschutz des einzelnen Holz-Lehm-Verbundelement betrifft, lassen sich keine genauen Angaben zur Brandwiderstandsdauer geben, da es einen entsprechenden Brandversuch mit diesem neu entwickelten Bauteil natürlich noch nicht gibt. Allerdings ist in der Literatur und in diversen Brandexperimenten nachgewiesen, dass Lehm mit 1200 kg/m^3 zumindest als sehr schwer entflammbar (B1 nach Din 4102), bis hin zu nicht brennbar (A 1 nach Din 4102), einzustufen ist. Eine Brandqualifikation für das gesamte Bauteil von REI30 bis REI60 ist daher auf alle Fälle zu erwarten. Der Umstand, dass die tragende Holzkonstruktion 12 cm hinter der beflammbaren Oberfläche aus schwerem Lehm liegt, lässt auch eine Vermutung auf REI90 und mehr als gerechtfertigt erscheinen.

Jede in der OIB beschriebene Brandschutzwiderstandsdauer kann das Holz-Lehm-Verbundelement nicht nachweisen, da die entsprechenden Tests und Prüfungen noch nicht existieren.

Die Tauglichkeit des Holz-Lehm-Verbundelement für den Flachbau mit REI30 und maximal REI60 lässt sich jedoch aufgrund der Brandqualifikation von Lehm 1200 (A1, A2 und mind. B1) sehr wohl vermuten.

Die Brandmauern, die einen Nachweis für nicht brennbare Materialien benötigen, können diesen mit zusätzlichem, nicht brennbarem Lehmputz ($\text{ca } 1700 \text{ kg/m}^3$) erfüllen. Der Ausblick zeigt eindeutig, dass dringend Brandversuche gemacht werden müssten, damit Lehm auch hier seine derzeit noch verborgenen Stärken ausspielen kann. Das ist nicht nur ein Anliegen dieser Studie, sondern allgemein ein Mangel in der Lehmindustrie.

Zusammenfassung:

Bis auf die Brandqualifikation, die nicht gesichert definiert werden kann, können alle anderen erforderlichen bauphysikalischen Funktionen unter gänzlichem Verzicht auf künstliche Baustoffe von dem neuen Holz-Lehm-Verbundelement übernommen werden. Verwendete Materialien sind: Holz, Lehm und Flachs.

Überlegen ist diese Bauweise gegenüber der herkömmlichen also in baubiologischer und ökologischer Hinsicht. Auch was die Behaglichkeit für den Nutzer betrifft, kann das Holz-Lehm-Verbundelement einen deutlichen Mehrwert gegenüber herkömmlichen Holzrahmenelementen leisten.

6.6. DIMENSION UND AUFBAU DES HOLZ-LEHM-VERBUNDELEMENTES

Lehm300 mit einem Raumgewicht von 300 kg/m ³ (wahlweise bis 600 kg) – außen	8 cm
Holzständerkonstruktion mit Holzfaserdämmung (Stärke je nach Anforderung variabel)	14 cm
aussteifende Holzdiagonalschalung	2,4 cm
Lehm1200 mit Raumgewicht von 1200 kg/m ³ - innen.	12 cm

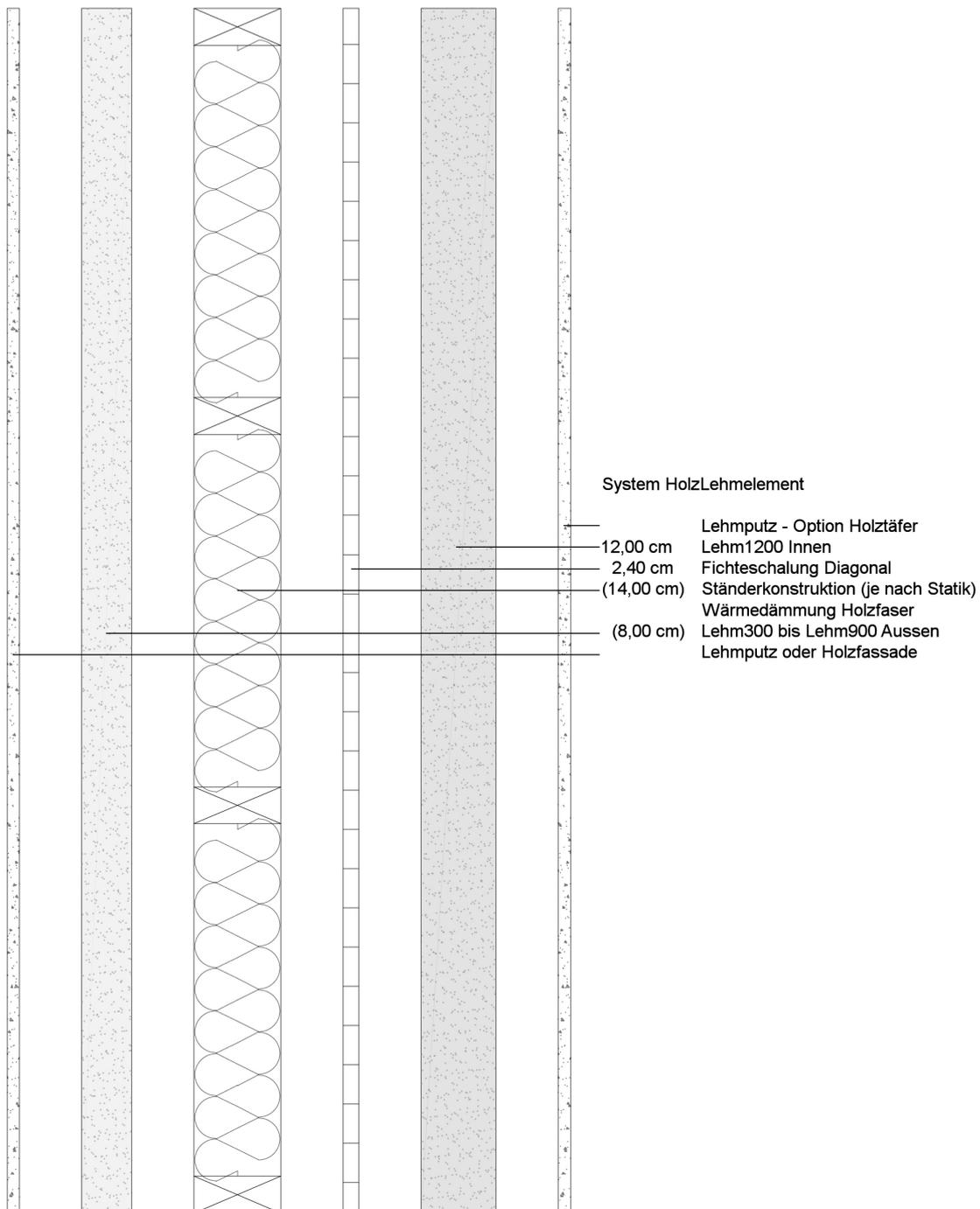


Abbildung 22. Schichtenaufbau des Holz-Lehm-Verbundelementes. © Andreas Breuss.

6.7. DAS HOLZ-LEHM-VERBUNDSYSTEM

Die einzelnen Holz-Lehm-Verbundelemente sollen werkseitig vorgefertigt und als Fertigteile auf der Baustelle versetzt werden. Fertigteil heißt in dem Zusammenhang nicht, dass ein starres System erstellt wird, sondern nur dass frei gestaltbare Rahmenelemente im Werk vorgefertigt werden. Breite, Höhe und Form sind frei wählbar. Durch das „Gießen“ von Lehm in eine Schalung könnten auch freie oder runde Formen geschaffen werden. Einzige Einschränkung kann ein Gewichtslimit beim Transport sein.

Die Elementierung berücksichtigt im vorliegenden Fall montier- und transportierbare Einheiten. Elemente mit 2 x 3 m Größe lassen sich mit einem Standard-LKW transportieren und mit einem LKW-Kran versetzen. Das Holz-Lehm-Verbundelement mit oben genanntem Aufbau hat ein Gewicht von 205 kg/m².

Der Zusammenbau erfolgt auf bauseitig errichteten Fundamenten, auf die Stahlwinkel vormontiert werden, die die Position der Wände bestimmen. Um den Einsatz dieser Winkel zu minimieren, gibt es nur jeweils am Elementstoß einen Standardwinkel (BMF 105) an dem die Elemente ausgerichtet und angeschraubt werden. Die Diagonalschalung überlappt derart, dass die Elemente in diesem Stoß der Norm entsprechend genagelt werden können. Aus statischen Gründen ist ein Steher für diese Anforderung stärker ausgebildet und erhält eine Dimension von 10 x 14 cm, statt der sonst eingesetzten 6 x 14 cm [Kap. 8.2. Abb. 36, S. 57]. Die einzelnen Elemente müssen, wie im klassischen Holzrahmenbau, gegen Kippen gesichert werden, bis die Decke montiert ist.

Am Elementstoß ist der Lehm entsprechend ausgenommen, um die Elemente zu verbinden bzw. um später die wind- und luftdichten Schlusselemente einsetzen zu können.

6.7.1. Montageablauf von Holz-Lehm-Verbundelementen

In den folgenden Grafiken (s. Bild 1 bis Bild 5) wird der Montageablauf der neuen Holz-Lehm-Verbundelemente beschrieben und grafisch dargestellt.

Bild 1: Die Winkel werden am Streifenfundament befestigt und die Holz-Lehm-Verbundelemente werden mit Transportschutz an den Ecken auf die Baustelle geliefert.

Bild 2: Auf dem Streifenfundament ist ein glattgestrichenes Mörtelbett vorbereitet. Der Transportschutz wird entfernt und das Element an den Winkeln eingerichtet.

Bild 3: Die Holz-Lehm-Verbundelemente werden an den Winkeln befestigt, und am Elementstoß werden die Diagonalschalungen mit den benachbarten Stehern kraftschlüssig vernagelt oder verklammert.

Bild 4: In die Ausnehmung am Elementstoß wird Lehmschlämme eingestrichen und ein Flachsvlies eingedrückt. Darüber wird eine weitere Lage Schlämme gestrichen. Das Armierungsvlies aus Flachs verhindert Rissbildung.

Bild 5: In die geschlammte Fuge werden vorgefertigte Schlusselemente mit der gleichen Rohdichte wie das jeweilige Lehmelement gedrückt. Die Schlusselemente werden mit Lehm eingemörtelt und eingepresst bzw. außen glatt verstrichen. Das Element ist nun innen und außen dicht.

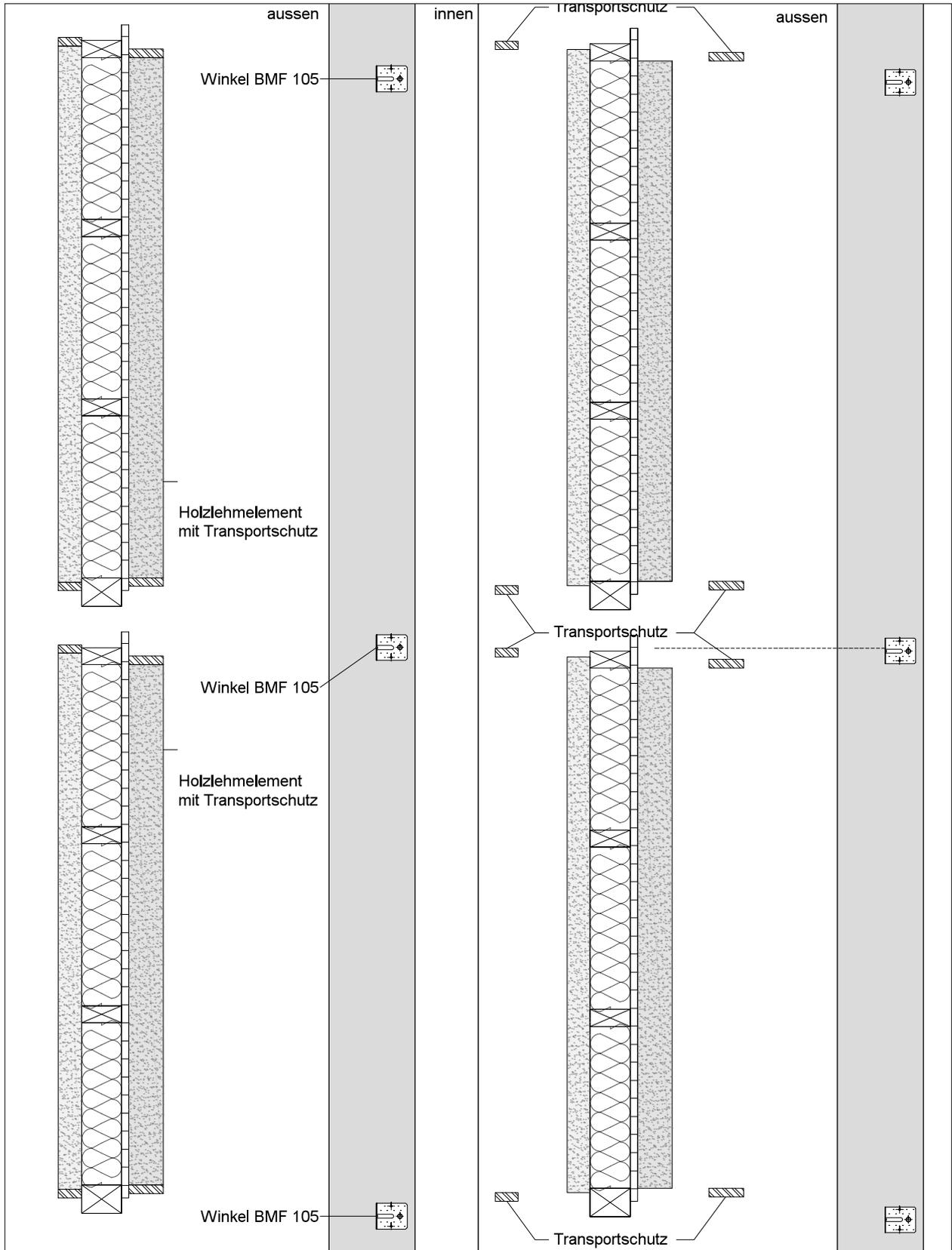


Bild 1

Bild 2

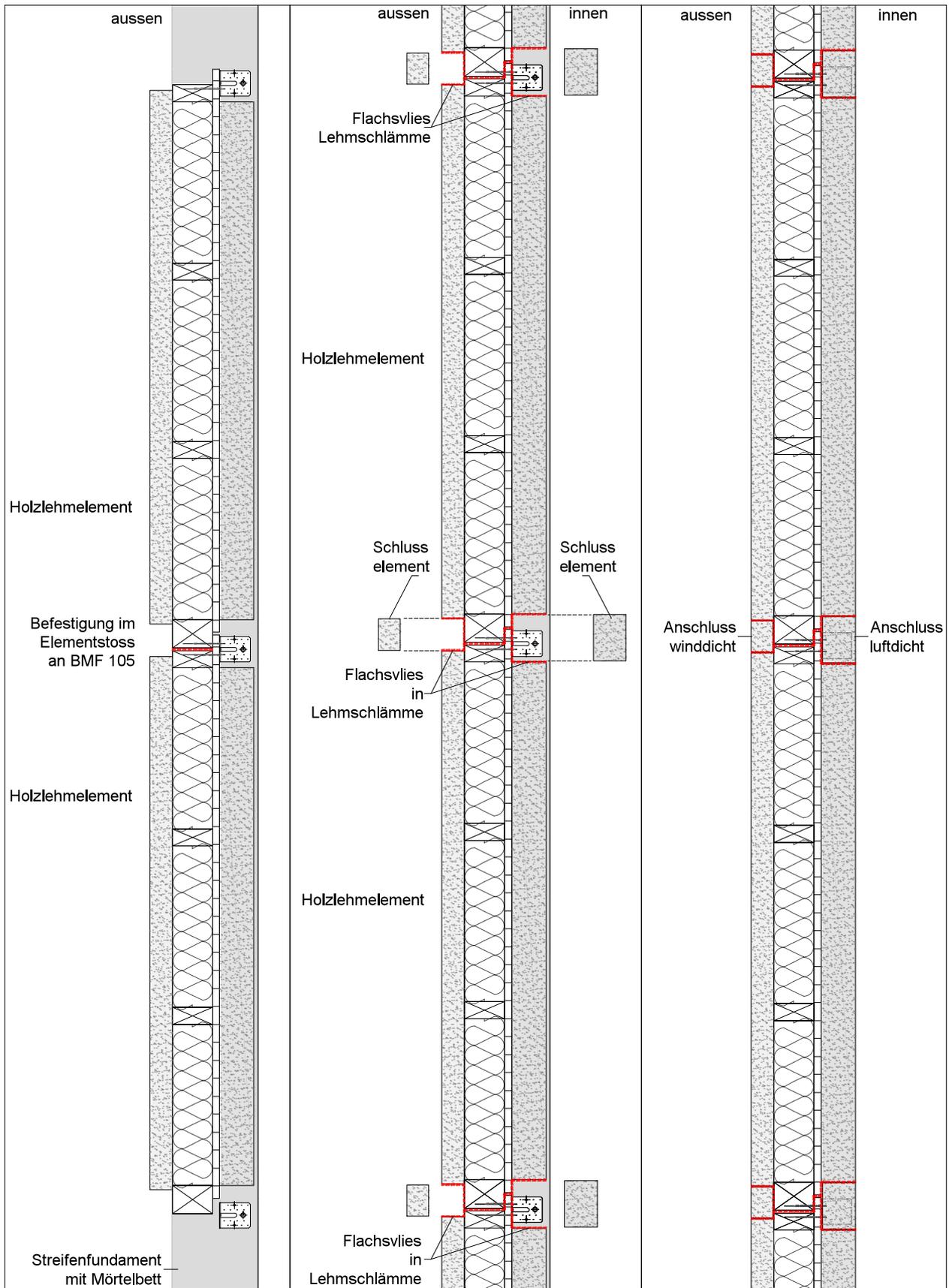


Bild 3

Bild 4

Bild 5

Abbildung 23. Montage des Holz-Lehm-Verbundelementes. © Andreas Breuss.

6.7.2. Holz-Lehm-Verbund-Grundelement

Das Grundelement hat in dem untersuchten Beispiel eine Größe von 2 x 3 m (siehe Abb. 24). Das Element hat ein Gesamtgewicht von circa 1200 kg. Ein vorgefertigtes Stampflehmelement bei gleicher Wandstärke (35 cm) und Größe (6 m²) hätte zum Vergleich zwischen 4600 kg bis 5000 kg und wäre in der Herstellung, beim Transport und auch bei der Montage nur mit aufwändigem Gerät zu handhaben. Gleichzeitig könnte dieses Element in Stampflehm aber auch den erforderlichen Wärmeschutz nicht leisten und müsste zusätzlich gedämmt werden, was die Wandstärke weiter aufblähen würde.

Der Vorteil der hier entwickelten Bauweise ist die Kombination des leichten Holzbaus mit einer massiven Bauweise. Sie stellt sozusagen ein Hybrid beider Systeme dar. Einfachheit und Variabilität in der Konstruktion sind gepaart mit einem extrem hohen Vorfertigungsgrad.

In dem sehr umfangreichen Bauteilkatalog von DATAHOLZ [vgl. DATAHOLZ, 2013] werden relevante bauphysikalischen Kennwerte von unterschiedlichen Bauteilen angeführt. Ein Vergleich der speicherwirksamen Massen von Holzrahmenelementen, Holzmassivelementen, Ziegelmauerwerk und dem neuen Holz-Lehm-Verbundelement zeigt die Stärke dieser neuen Mischbauweise.

Bauteil	Speichermasse m_{wbA} (kg/m ²) ohne Innenputz	Speichermasse m_{wbA} (kg/m ²) mit Lehmputz 1700 kg/m ²	U-Wert W/m ² K	Quelle
Holzrahmenelement mit Vollholzschalung, 35 cm	28,7	65,8	0,22	dataholz
Holzmassivelement mit BSP, 34 cm	46,4	74,1	0,21	dataholz
Holz-Lehm-Verbundelement, 36,5 cm	92,8	108,9	0,25	TB Leiler*
Lehmputz ,Porothermziegel 25-38, EPS, 39 cm	66,2	77,7	0,24	TB Leiler*
Thoma Holz100 ohne Außendämmung, 36,5 cm	31,4	60,6	0,20	TB Leiler*
Vollziegelmauerwerk 1600, 49 cm	115,7	123,5	1,16	TB Leiler*

Tab. 9: Vergleich der Speichermassen von unterschiedlichen Bausystemen. * Berechnung nach Önorm b 8110-3 siehe Anhang.

Es zeigt sich, dass das Holz-Lehm-Verbundelement auch deutlich bessere Werte als Porothermziegel mit ähnlichem U Wert hat, und nur knapp hinter dem Vollziegel ohne Dämmung liegt.

Eine deutliche Verbesserung aller Bauteile lässt sich übrigens mit 2 cm Lehmputz erzielen (s. Tab. 9)

Welche Vorteile bringt eine große Speichermasse?

In erster Linie werden große Luftfeuchtigkeits- und Temperaturschwankungen verhindert.

Sowohl große Unterschiede in der Luft- und der Oberflächentemperatur, als auch Temperaturunterschiede im Raum können durch Bauteile mit großer Speichermasse gut abgefedert werden, und führen so zu einem behaglichen Raumklima. Schwere Bauteile können überschüssige Wärme aus der Raumluft aufnehmen und diese speichern. Sobald es kälter wird, strahlen die warmen Wände und Decken die Wärme wieder ab, oder umgekehrt können Speicherwände die kühle Nachtluft phasenverschoben untertags wieder abgeben, und so die Räume länger kühl halten. Das gilt auch für die Luftfeuchtigkeit. Das massive Lehmelement innen kann diese auf einem für den Menschen gesunden Niveau zwischen 40 und 60 % über eine längere Dauer halten.

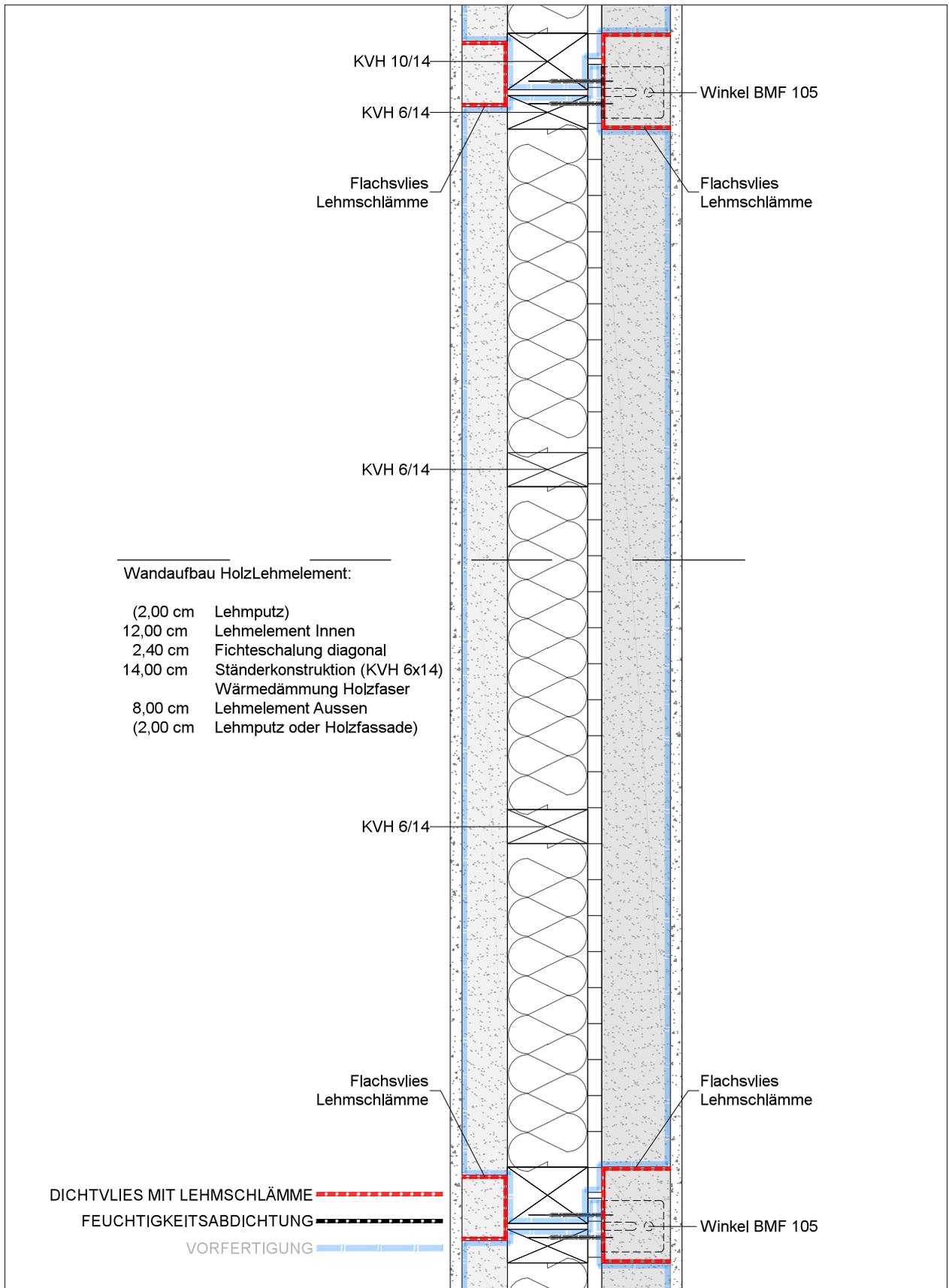
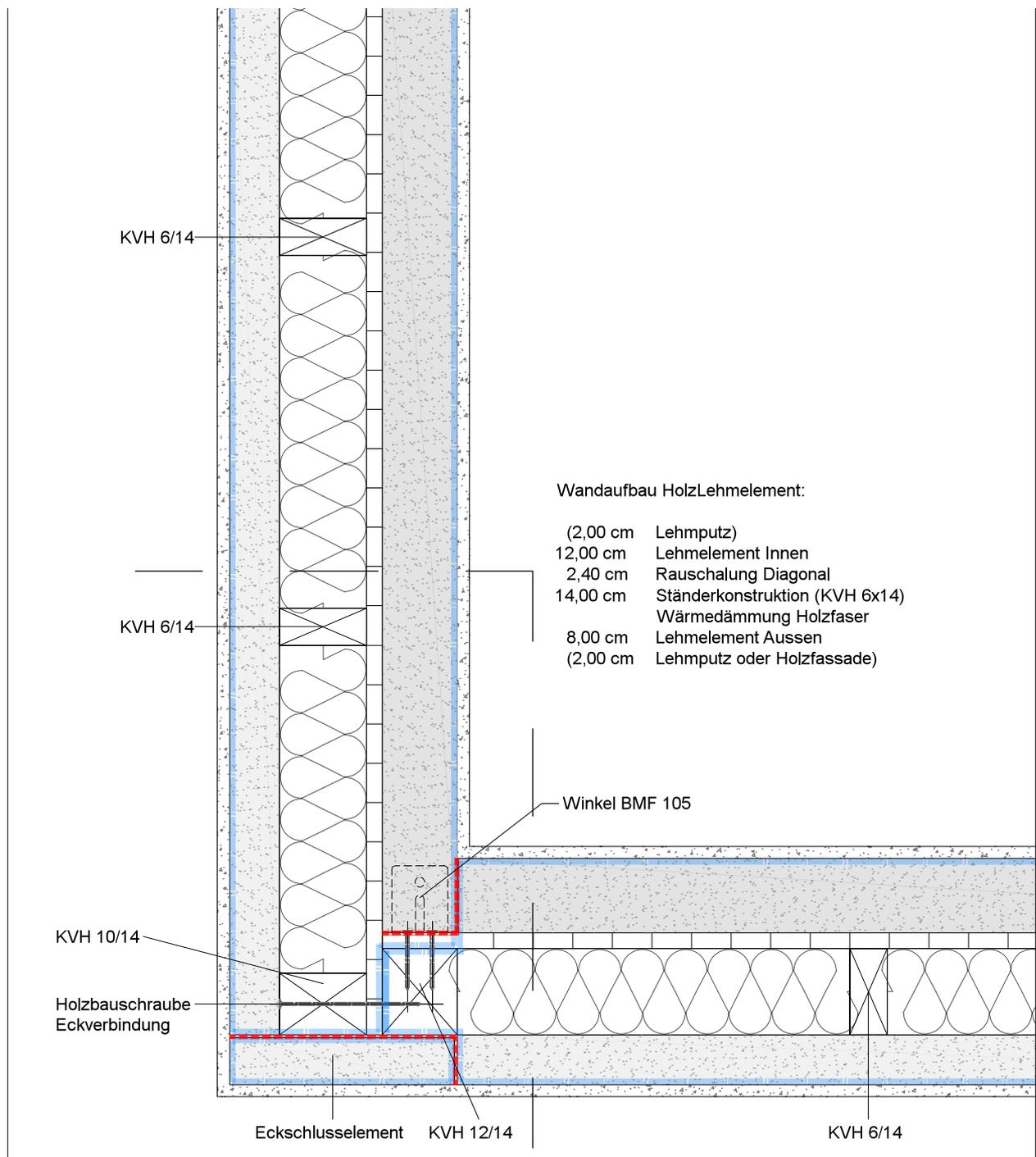


Abbildung 24. Holz-Lehm-Verbund_Grundlelement. © Andreas Breuss.

6.7.3. HOLZ-LEHM-VERBUNDELEMENT ECKANSCHLUSS

Die folgende Abbildung 25 zeigt das Regeldetail einer Eckausführung. Das in der Skizze rechts liegende Element wird zuerst am Stahlwinkel (BMF105) ausgerichtet und befestigt. An diesem Element befindet sich der letzte Steher 12x14 cm (anstatt KVH 6 x 14 cm) genau in der Flucht des inneren Lehmelementes und dient der Verschraubung mit dem um 90 Grad verdrehten Eckelement. Dieses erhält als Abschlusssteher ein KVH mit 10x14 cm, um einen entsprechenden Querschnitt für die kraftschlüssige Eckverbindung mit 8mm Holzbauschrauben zu gewährleisten. Anschließend wird außen, wie bereits weiter oben beschrieben, eine Lehmschlämme mit Flachsvlies für die Winddichtigkeit angebracht, und die Ecke mit einem vorgefertigten Lehm300 Eck-Schlusselement im Lehmörtelbett geschlossen.

Abbildung 25. Holz-Lehm-Verbund_Eckelement. © Andreas Breuss.



6.7.4. FENSTERANSCHLUSS

Abbildung 26 stellt ein Regeldetail eines Fenster- bzw. Terrassentüranschlusses dar. Das Fenster wird mit Einbauluft an der Holzkonstruktion des Holz-Lehm-Verbundelementes angeschlossen. Mit Flachsvlies in Lehmschlämme werden die dichten Anschlüsse an den Holzfensterstock ausgeführt.

Innen wird ein Schilfstukkaturrohr als Putzträger für den Lehmputz angebracht, während außen ein schwerer Holzfaserdämmstreifen, der überputzbar ist, die Fuge zwischen Rahmen und Putz überbrückt. Statt mit Außenputz, lässt sich dieses Detail auch mit einer hinterlüfteten Holzfassade lösen. Das Holz-Lehm-Verbundsystem ist nicht auf Putz außen beschränkt, soll bewusst alle architektonischen Entscheidungsmöglichkeiten offen lassen.

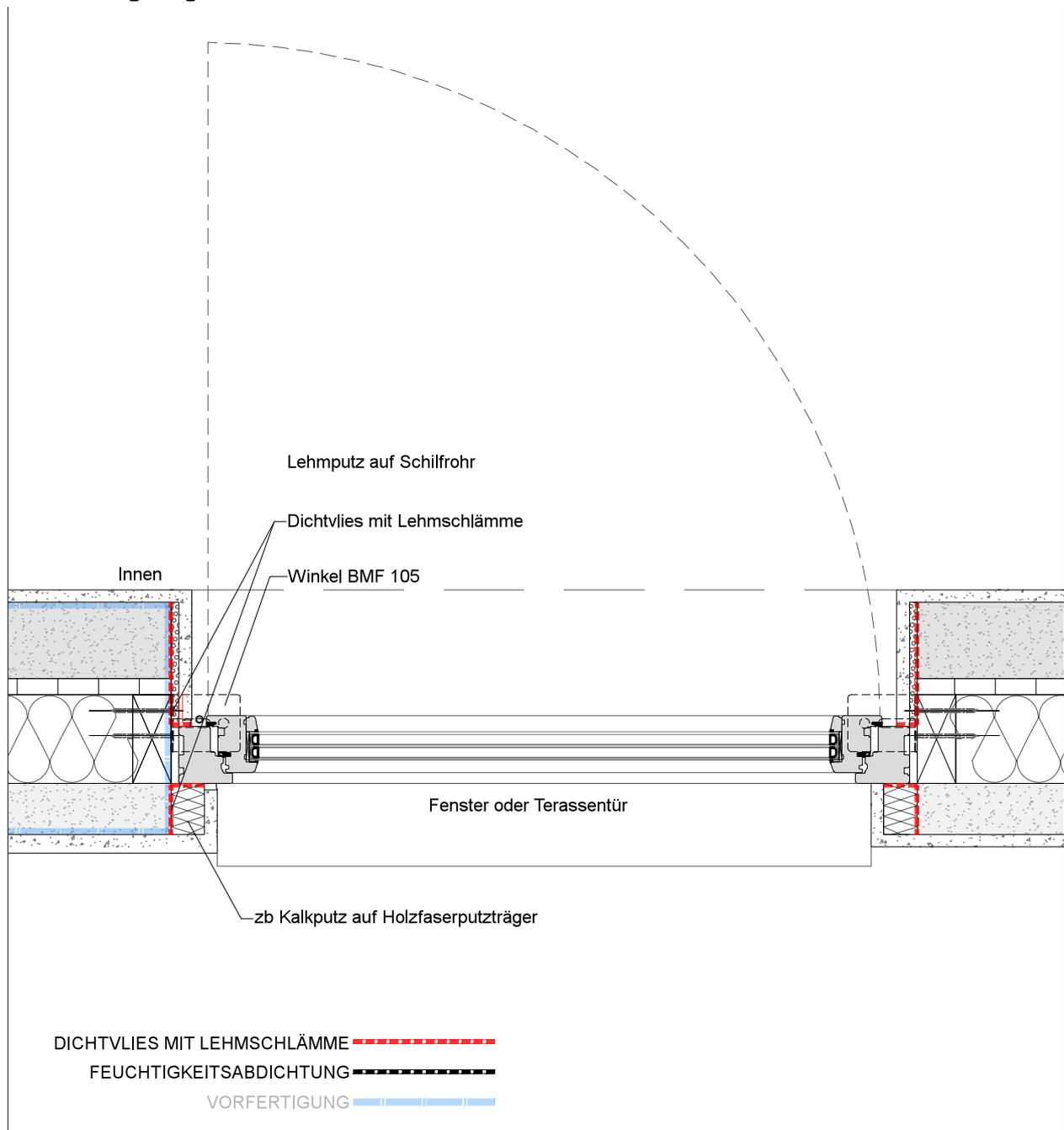


Abbildung 26. Holz-Lehm-Verbundelement - Fensteranschlusselement. © Andreas Breuss.

6.7.5. SOCKEL ANSCHLUSS

Wie in Abbildung 27 zu erkennen ist, werden aus dem klassischen Holzrahmenbau bekannte Sockeldetails verwendet. Es besteht bei der Entwicklung dieses System die Absicht, so viele praxiserprobte Details des herkömmlichen Holzrahmenbaus wie möglich einzugliedern. Im Spritzwasserbereich kann jedes taugliche Plattenmaterial oder entsprechender Putz verwendet werden. An diesen schließt der äußere Kalkputz an. Wenn eine Holzfassade gewünscht ist, sollten standardisierte und geprüfte Sockeldetails verwendet werden. Das äußere Lehmelement muss vor Feuchte- und Nässeintritt gut geschützt sein. Da die außen liegende Feuchtigkeitsisolierung dampfdicht macht, muss auch innen im Fußbodenbereich bis 10 cm über der äußeren Feuchtigkeitsisolierung eine Dampfsperre angebracht werden. Der Fußbodenaufbau ist abhängig von der Bodenbeschaffenheit. Wenn es einen entsprechend festen Untergrund gibt, und kein drückendes Wasser von unten zu erwarten ist, genügt Schaumglaschotter zwischen den Streifenfundamenten. Selbstverständlich lässt sich das System auf Keller baugleich anwenden, so wie auch herkömmliche Holzrahmensysteme. Die entsprechenden Sockeldetails können von dort übernommen werden.

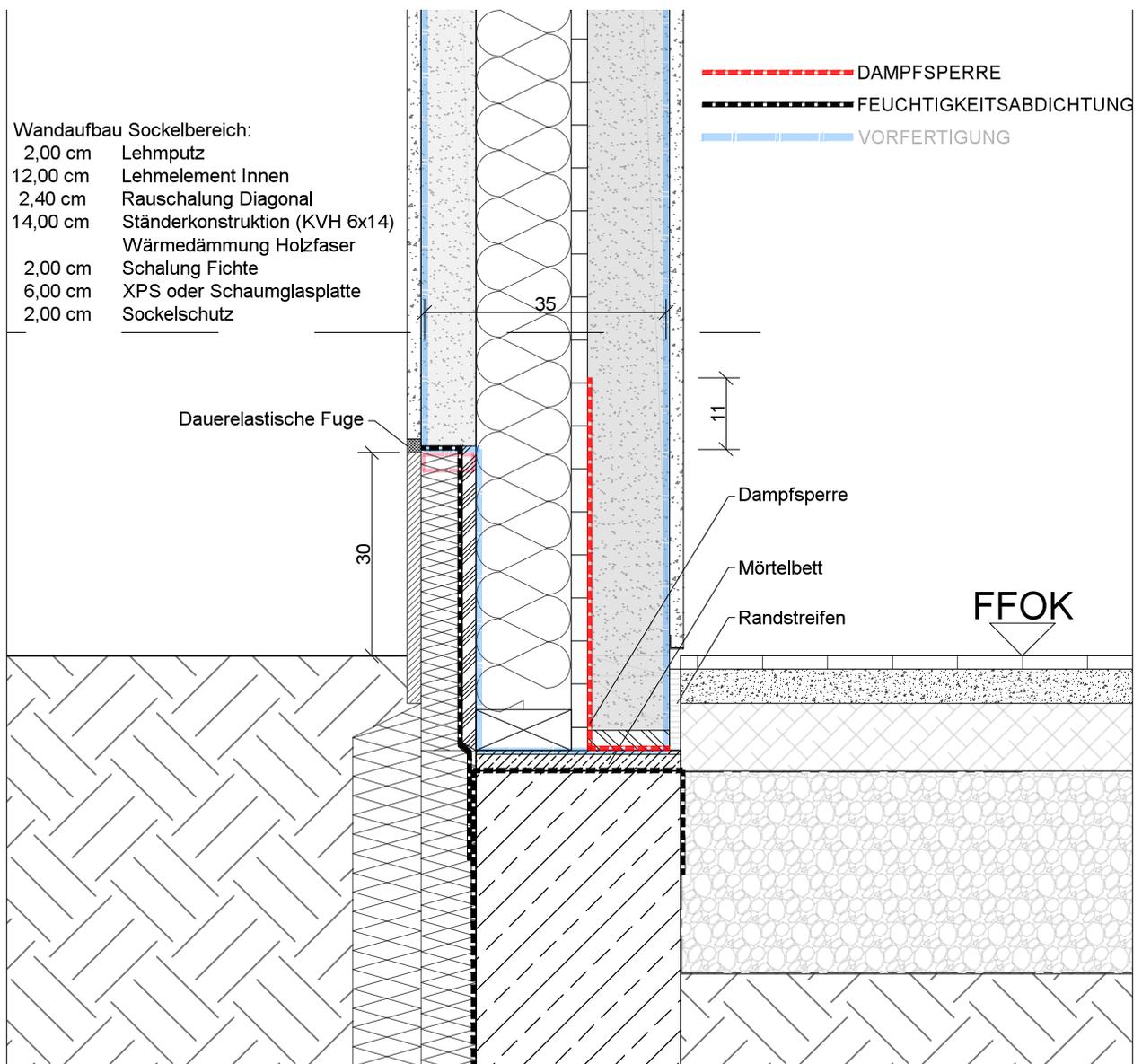


Abbildung 27. Holz-Lehm-Verbundelement - Sockelanschluss. © Andreas Breuss.

6.7.6. ANSCHLUSS GESCHOSSDECKE

Der Übergang Wand zu Decke (Abbildung 28) ist besonders heikel im Hinblick auf die Luftdichtigkeit. Laut KOLB ist darauf zu achten, dass die Luftdichtung fugenlos unter und neben der Decke durchgeht. Es sollte auf keinen Fall zu einer Durchdringung kommen. Im vorliegenden Fall wird nach der Montage des Geschosselementes ein Vlies in Lehmschlämme aufgebracht und umgeschlagen. Nach der Montage des Deckenelementes wird das umgeschlagene Ende wieder in Lehmschlämme gedrückt und das nächste Holz-Lehm-Verbundelement aufgesetzt. Von außen wird in der Ebene der Decke zusätzlich noch ein Streifen

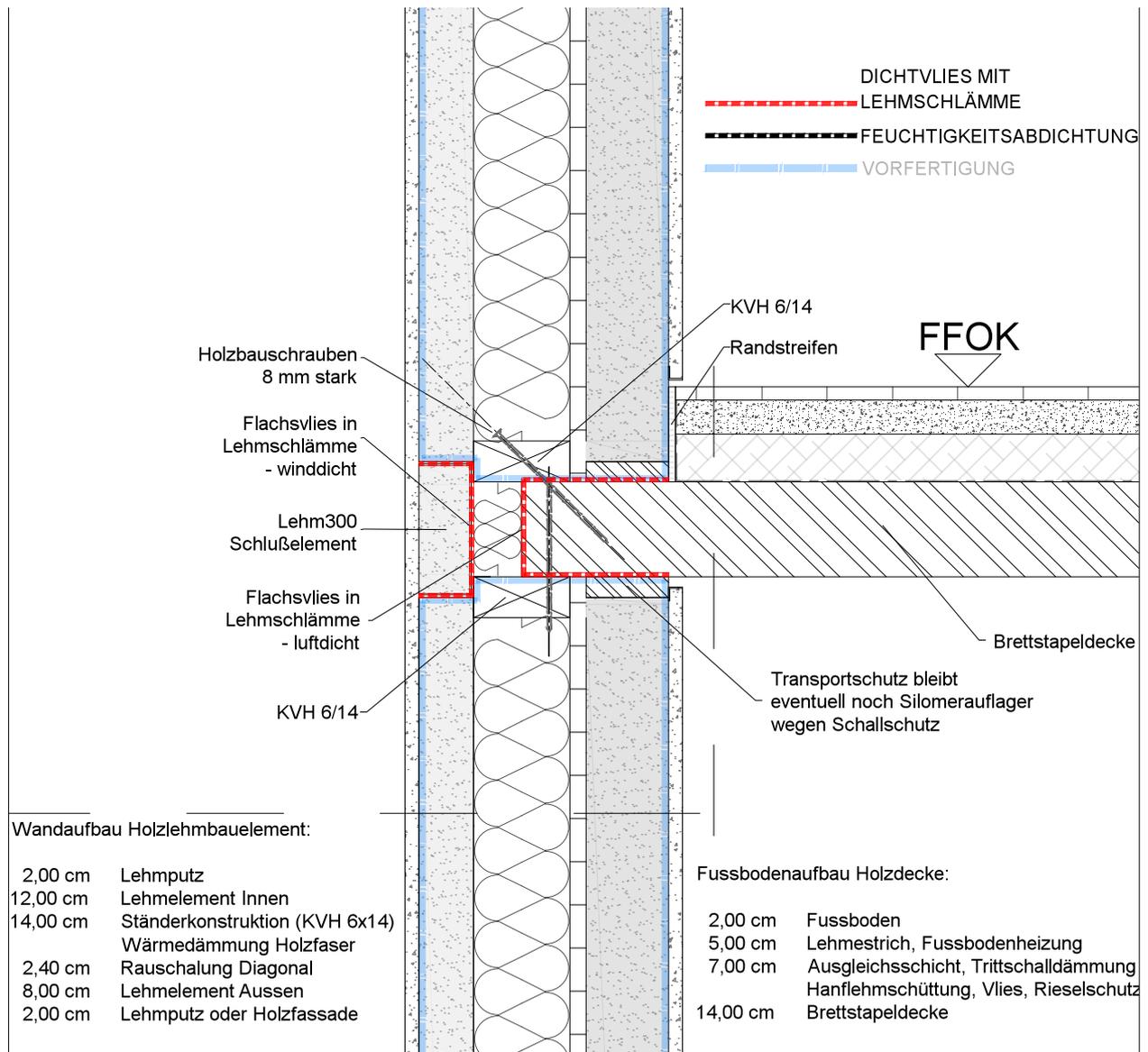


Abbildung 28: Holz-Lehm-Verbundelement - Geschossdecke. © Andreas Breuss.

dichter Holzfaserdämmstoff in die Schlämme gedrückt, um eine Überdämmung der Deckenstirnseite zu erreichen. Auf diese wird dann die äußere Schlämme gestrichen, das Flachsvlies eingedrückt, und das

vorgefertigte Schlusselement in den Lehmörtel eingedrückt, und außen glatt abgestrichen. Die Elementstöße sind damit luft- und winddicht.

Es lassen sich alle Anschlussstellen in der gleichen einstofflichen Art mit Lehm so lösen, dass sie luft- und winddicht sind. Es sind keine weiteren künstlichen Baustoffe nötig.

6.7.7. FLACHDACHANSCHLUSS

Abbildung 29 stellt einen Flachdachanschluss mit Attika dar. Die Attikaelemente sind vorgefertigt und werden auf die Holzdecke montiert.

Das äußere Schlusselement hat stets die gleiche Dimension und Abmessung, und kann deshalb ähnlich einem Strangpressprofil beliebig abgelängt und eingesetzt werden.

Jeder beliebige Aufbau eines Flachdaches ist mit diesem System möglich. Im gegenständlichen Fall wird ein Gründachaufbau dargestellt.

Weiters ist in Abbildung 30 ein Fenstersturz dargestellt, der auch als eigenes Element vorgefertigt ist und mittels Schwalbenschwanzverbindungen in die seitlichen Steher der Wandelemente eingehängt wird.

Wenn eine raumhohe Tür ohne Sturz gewünscht wäre, käme beim Attikaelement anstatt einer Holzriegelkonstruktion eine gedübelte Brettstapelwand zur Ausführung, die oben auf die Decke aufgesetzt und von unten mit dieser verschraubt wird. Auch diese Variante der Attika kann vorgefertigt werden.

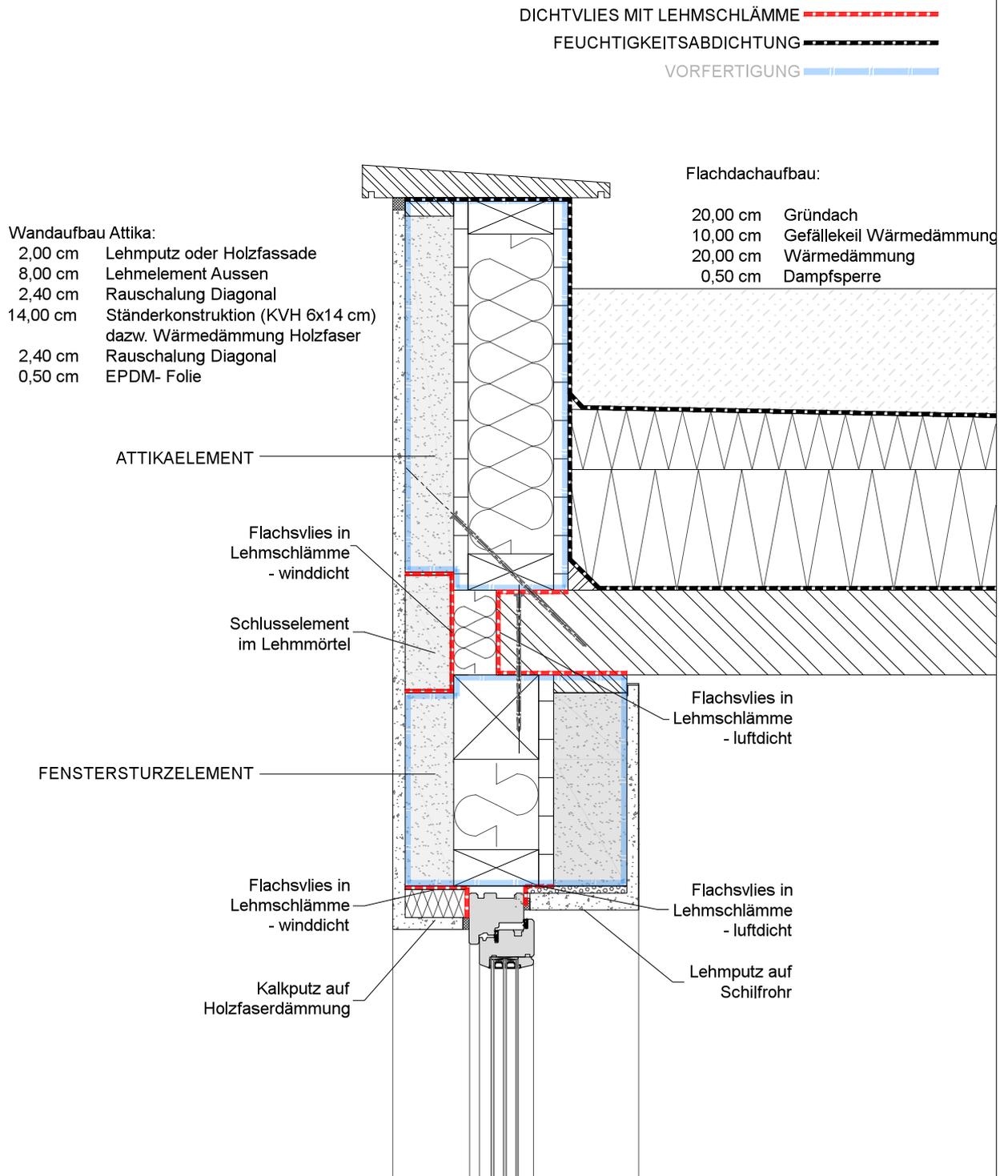


Abbildung 29: Holz-Lehm-Verbundelement – Attika- und Fenstersturzan­schluß. © Andreas Breuss.

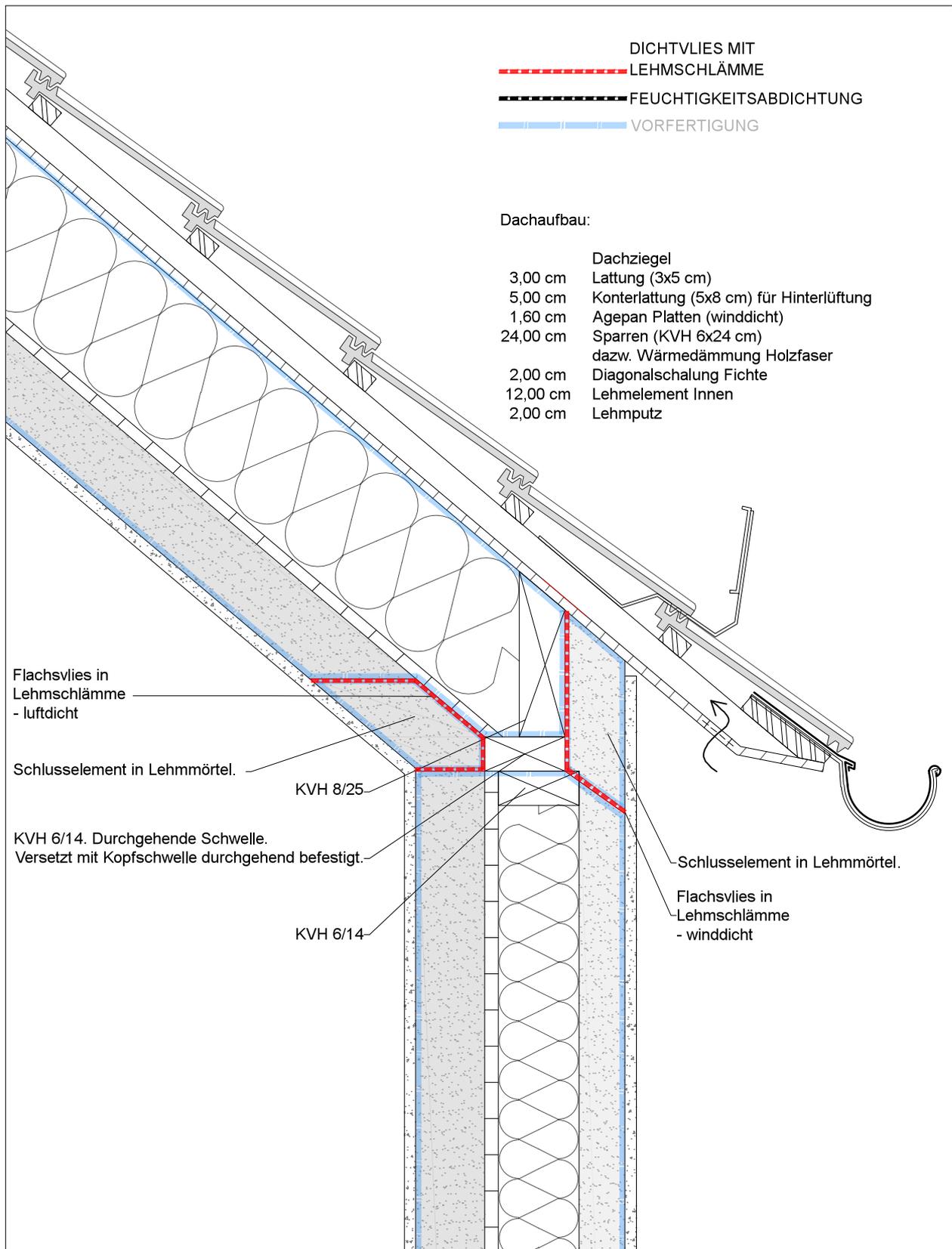


Abbildung 30: Holz-Lehm-Verbundelement – Satteldachanschluß. © Andreas Breuss.

6.7.8. SATTELDACHANSCHLUSS

Die Dachelemente sollen ebenfalls im gesamten Aufbau vorgefertigt sein und möglichst in den dreistofflichen Kreislauf - Holz, Lehm, Flachs - eingefügt werden. Abbildung 31 oben zeigt ein spezielles Traufendetail, bei dem im Rauminneren der Dachraum sichtbar bleiben kann. Ziel ist es, ohne Zugbänder oder sichtbare Zugbalken auszukommen, deshalb müssen die beiden Dachflächen und die Schwelle auf der obersten Geschossdecke diese Zugkraft aufnehmen.

Dazu wird auf der Kopfschwelle der Ständerkonstruktion eine durchgehende umlaufende Schwelle befestigt, die versetzt zur Kopfschwelle kraftschlüssig verschraubt wird. Diese bildet eine Art Zugband, auf das die Dachelemente versetzt werden, während zusätzlich über die Fläche der äußeren und inneren Verschalungen Kräfte aufgenommen und an die Stützen weitergegeben werden. Diese umlaufende Schwelle ersetzt gemeinsam mit der Scheibenwirkung des Daches das Zugband im Inneren.

Die Dachelemente haben raumseitig durchgehend Lehm 1200 auf einer Diagonalschalung angebracht, auf der mit verzahnten Holzleisten, die in der Schalung befestigt sind, der Lehm gehalten wird. Dies basiert auf einem althergebrachten Lehmbauprinzip, dass zwischen Holzbalken Staken gesteckt werden, die mit schweren Lehmpatzen beworfen sind und den Lehm halten.

Diese historische Technik ist als Spalierdecke überliefert. Bei dieser Methode wird ... „der von oben

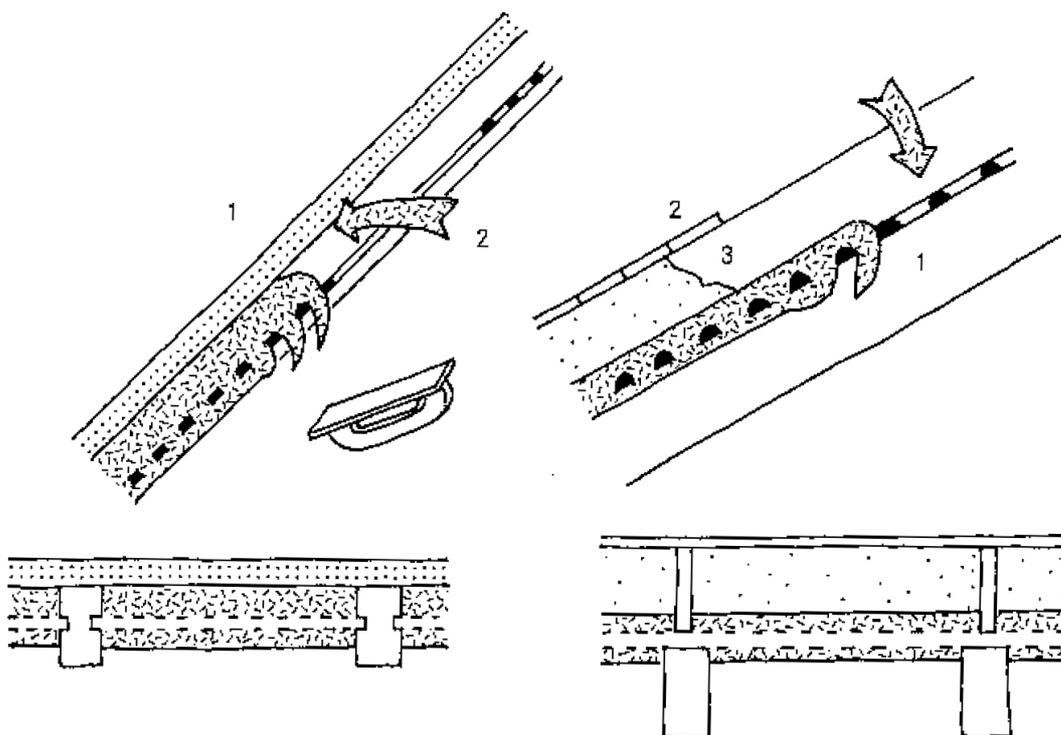


Abbildung 31: Spalierdecke, bei der Lehm zwischen Staken eingebracht und von diesen gehalten wird.

aufgefüllte zähklebrige Leichtlehm...durch die 3 bis 5 cm breiten Zwischenräume eines Tragostes gedrückt, bis etwa 5 – 10 cm lange Zungen herunterhängen, die mit einem schmalen Reibebrett von unten wieder an die Decke gedrückt und mit Häcksellehm glatt verrieben werden...“ [VOLHARD, 2013, S. 120].

Diese alte Technik wird abgewandelt, indem Staken in der Schalung befestigt werden, und der Lehm in das bei der Herstellung liegende Element eingerüttelt und verdichtet wird. Nach der Trocknung ist der Lehm

kraftschlüssig mit den Holzstaken verbunden. Praxistests werden ergeben, ob dem Lehm allenfalls noch Flachsfasern oder ein vollflächiges Flachsvlies als Armierung zugegeben werden müssen.

Die Diagonalschalung übernimmt zusammen mit der außen liegenden Beplankung die oben beschriebene Scheibenwirkung des Daches.

Das Sparrendach selbst wird auch mit Holzfasern gedämmt und außenseitig mit einer wasserführenden Ebene aus Agepanplatten abgeschlossen. „Die „AGEPAN® DWD protect ist eine diffusionsoffene Holzfaserverplatte, die im Dach als Unterdeckplatte und im Wandbereich als feste Beplankung hinter belüfteten Bekleidungen eingesetzt wird. Sie darf außerdem entsprechend der DIBt- Zulassung Z-9.1-382 zur Knick- und Kippaussteifung der Rippen von Holztafelbauelementen, sowie als aussteifende und mittragende Beplankung von scheibenartig beanspruchten Tafeln gemäß DIN EN 1995-1-1 in Verbindung mit NA verwendet werden. Bei der Herstellung im Trockenverfahren werden die aufgeschlossenen Holzfasern mit PUR-Bindemittel besprüht und zu einer homogenen Platte gepresst. AGEPAN® DWD protect ist mit stumpfer Kante, mit umlaufendem oder 2-seitigem Nut- und Federprofil erhältlich. Dadurch kann die AGEPAN® DWD protect winddicht und regensicher ausgebildet werden.“ [BAUBOOK, 2012, Produktindex: 3534 af, s. Anhang]

Laut Baubook sind 90 % der Platte aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, allerdings sind die Holzspäne mit PMDI Leimen geklebt. Trotzdem sollen alle Kriterien von Baubook in Bezug auf Inhaltsstoffe, Herstellung und Emission von diesem Produkt eingehalten werden [BAUBOOK, 2012], und die Agepanplatte ist zudem auch PEFC-COC3 zertifiziert

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass bei einem offenen Satteldachraum der dreistoffliche, chemiefreie Kreislauf (Holz - Lehm - Flachs) nicht eingehalten werden kann, da mit Lehm eine wasserabweisende Schicht unter der Dachdeckung nicht erstellt werden kann.

6.7.9. Haustechnikinstallation beim Holz-Lehm-Verbundsystem

Installationsleitungen werden bei herkömmlichen Holzrahmenkonstruktionen als eigene vorgesetzte Schale ausgeführt, damit die dampfbremsende und luftdichte Ebene nicht mit Leitungen und Schalterdosen durchdrungen wird. Deshalb ist bei der klassischen Bauweise eine saubere Trennung von Konstruktion und Installation auf jeden Fall mit einer zusätzlichen vorgesetzten Leichtwand erforderlich. Das bedeutet aber, dass die ohnehin schwache Speichermasse des Holzrahmenbaus im Innenraum noch weiter geschwächt wird.

Die Erwartung an das neue Holz-Lehm-Verbundsystem ist, dass keine weitere Schicht hinzugefügt werden muss, sondern dass die innere Schicht Lehm1200 auch Installationen aufnehmen kann. Das Lehm1200 Element ist somit also luftdichte Ebene, Dampfbremse, Speichermasse, Feuchteregulator und Installationsebene in einem einzigen massiven Bauelement. Die Installationseinheiten können bereits werkseitig eingebaut werden.

Die Wirkung der Luftdichtheit ist laut deutschen Lehmbaueregeln [DACHVERBAND Lehm, 2009] ab 900kg/m^3 gewährleistet, wobei die Stärke des Bauteiles keinen Einfluss auf die Dichtigkeit hat. Das bedeutet, dass eine Schwächung von Lehm1200 auf ein gewisses Mindestmaß keine Veränderung der bisher beschriebenen Funktionen und Eigenschaften bewirkt. SCHROEDER [SCHROEDER, 2010, S. 283] gibt vage an, dass Leichtlehm mit einer Stärke von 5 cm noch als luftdicht bezeichnet werden kann.

Es kann also angenommen werden, dass eine Schwächung von Lehm1200 (Rohdichte = 1200kg/m^3) bis auf 5 cm Stärke keinen Einfluss auf die Luftdichtigkeit hat. So stehen also maximal 7 cm für das Schlitzen von Ausnehmungen zur Verfügung. Grundsätzlich wird für Strom – und Wasserleitungen eine Nut mit einer

Tiefe von 4 cm ausgenommen und werkseitig für das Einlegen von Leitungen vorbereitet. Dosen und Schläuche könnten schon im Werk eingebaut werden. Das gleiche gilt äquivalent auch für Wandheizungsregister, wo die werkseitige Montage auf alle Fälle wirtschaftlicher ist. Die Trocknung des gesamten Elementes erfolgt bereits mit den eingebauten Installationen. Abbildung 33 zeigt, dass Lehm1200 nie durchdrungen, oder so geschwächt wird, dass die Luftdichtigkeit in Gefahr ist, obwohl die Leitungen in der gleichen Ebene geführt werden und auf eine eigene Installationsschicht im gesamten Innenraum verzichtet werden kann. Bei Leitungsführungen, die mehr als 7 cm Platzbedarf haben, wie das etwa bei Ablauf- Lüftungsleitungen der Fall ist, müssten – wie im Holzrahmenbau auch üblich – eigene Verbindungsschächte zwischen den Geschossen geplant werden.

6.7.9.1. ZUSAMMENFASSUNG

Obwohl Leitungen in die dampfbremsende und luftdichte Ebene gebaut werden, verliert diese keine ihrer vorteilhaften Eigenschaften und notwendigen Funktionen.

Wenn der Wunsch besteht, Dosen oder Leitungen auf der Baustelle zu ändern oder neue hinzuzufügen, kann dies mit herkömmlichen Geräten, die auch zur Fräsung von Schlitzen im Mauerwerk verwendet werden, verwirklicht werden. Nach dem Versetzen der Dosen und Verlegen der Leitungen werden diese ausschließlich mit Lehmörtel und auf keinen Fall mit Gips oder Schnellzement eingemörtelt.

Das Holz-Lehm-Verbundelement ist somit ein - wahrscheinlich einzigartiges - System, bei dem man in die luftdichte Ebene nach Belieben hineinschneiden und über 7 cm eindringen kann, ohne dass eine Beeinträchtigung zu erwarten ist.

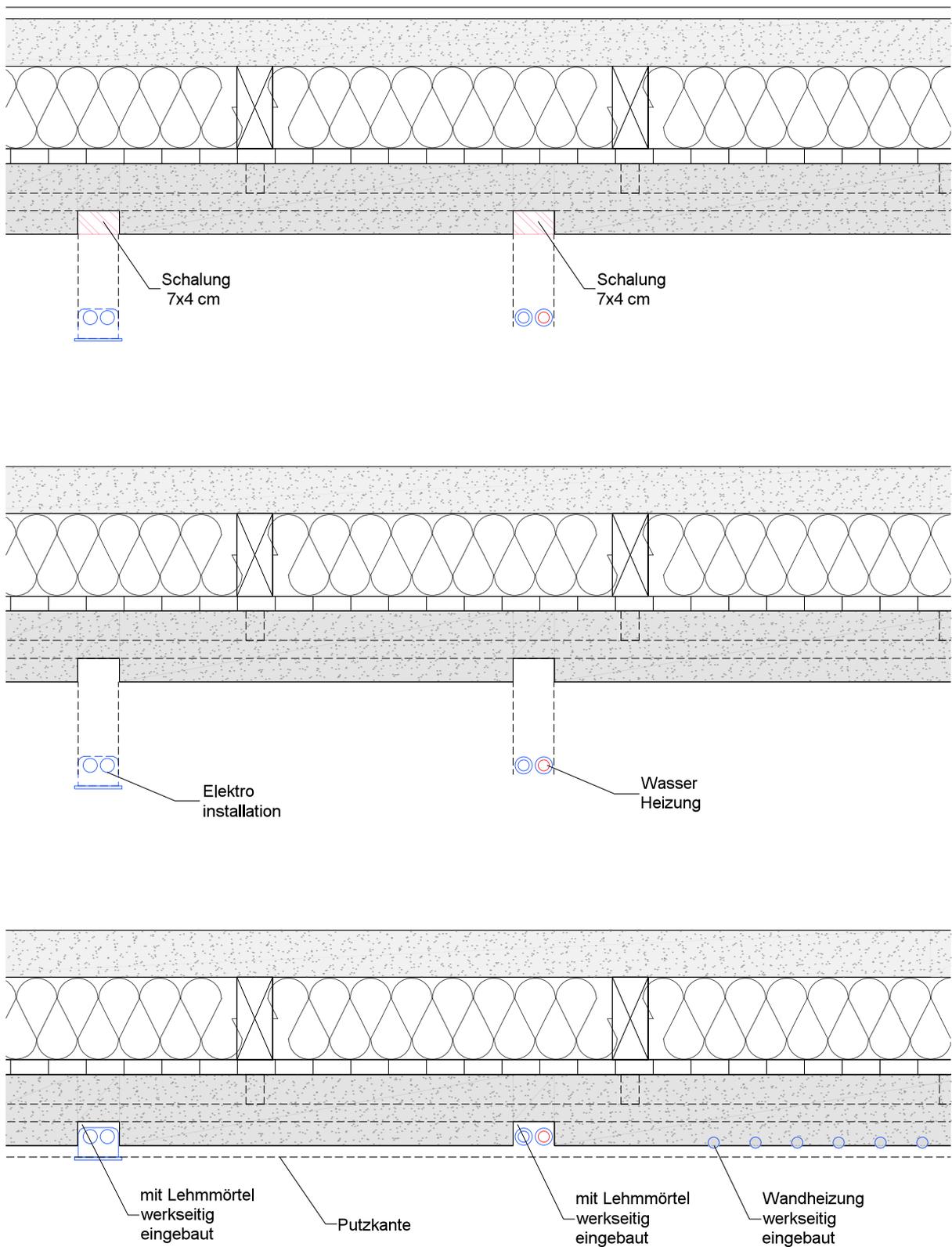


Abbildung 32: Schema der Vorinstallation von Elektro- und Wasserleitungen in das Holz-Lehm-Verbundelement. © Andreas Breuss.

7. HOLZ-LEHM-VERBUND-MUSTERELEMENT

Während die bauphysikalischen Nachweise theoretisch geführt und zum größten Teil berechnet werden können, lässt sich der mechanische Verbund zwischen Holz und Lehm nur anhand eines Musterelementes nachweisen. Basierend auf historischen Erkenntnissen von Lehmbauweisen wird die uralte Stakentechnik, wo Lehm in und um Holzleisten „eingehängt“ wird, adaptiert und als mechanische Struktur für die Verbindung der dazwischen liegenden Holzkonstruktion mit dem inneren und äußeren Lehmelement herangezogen.

Es wurden zahlreiche Tests und Versuche unternommen, denn die Stakenlage sollte so beschaffen sein, dass auch Bewegungen im Wandelement aufgenommen werden, die durch die Herstellung, den Transport sowie die Montage entstehen können.

Die Ergebnisse und die genaue Ausführung der Stakenlage werden hier nicht veröffentlicht.

Interessant ist nur das Ergebnis: Hält der Lehm an der Holzkonstruktion und hält er vor allem auch unterschiedlichen Erschütterungen stand?

Zum zweiten ist neben dem Raumgewicht die Konsistenz des Lehms von entscheidender Bedeutung. Zuschlagstoffe sind, neben Holzhäcksel und –spänen, nur noch Wasser, Sand und Kies. Die Zusammensetzung beeinflusst aber wesentlich das Schwindverhalten des Lehms, das so gering als möglich sein muss.

Auch hier wurden zahlreiche Vortests unternommen, deren Mischungsstoffe und -verhältnisse hier nicht veröffentlicht werden.

Das Musterelement hat eine Größe von 1,4 x 2 m.

7.1. HERSTELLUNGSVERFAHREN

Die Herstellung des Musterelements erfolgt in folgendem Ablauf:

- 1: Herstellung der Holzkonstruktion
- 2: Einbringen von Lehm1200, rütteln und Verdichten im liegenden Zustand
- 3: Trocknen des Musterelements in der Trockenkammer
- 4: Wenden des Musterelements
- 5: Einlegen der Holzfaserdämmung zwischen die Holzständerkonstruktion und Anbringen der Staken
- 6: Einbringen von Lehm300, rütteln und Verdichten im liegenden Zustand
- 7: Trocknen des Musterelements in der Trockenkammer
- 8: Transport des Musterelements
- 9: Montage des Musterelements auf ein vorbereitetes Betonfundament.
- 10: Beobachtung

7.2. BILDDOKUMENTATION

7.2.1. HOLZKONSTRUKTION

Die Holzkonstruktion besteht aus Schwellen und Stehern mit KVH 6x14 m, sowie einer rauen Fichteschalung mit 2,5 cm Stärke, die diagonal mit der Holzständerkonstruktion vernagelt wird. Der Abstand der Steher ist auf die Breite der Holzfaserdämmplatten abgestimmt.



Außenseitig werden Schaltafelelemente angebracht, die einerseits als Schalung für den Lehm und andererseits als Transportschutz Anwendung finden.

7.2.2. LEHM1200 – INNERES LEHMELEMENT

Lehm1200 wird eingebracht. Abgemagert wird der Lehm mit Sägespänen. Das Raumgewicht wird vorher anhand eines Handmusters geprüft. Der Lehm wird lose eingebracht und durch Rütteln um die Stakenkonstruktion verfüllt. Die Lehmoberfläche wird leicht verdichtet und dann mit einem Brett abgezogen.



7.2.3. TROCKNEN DES INNEREN ELEMENTS

Das Musterelement wird mit der einseitigen Lehmschicht liegend in die Trockenkammer gefahren. Dort verbleibt das Musterelement 120 Stunden bei einer Endtemperatur von 35 Grad. Das ist in etwa die Zeit, die ein KVH mit 8 cm Stärke für die Trocknung benötigen würde. Ein KVH mit 12 cm braucht entsprechend länger. Vor der Trocknung hatte die Vollholzschalung einen Feuchtegehalt von 14 %. Dieser Wert wurde für die Schalung auch nach der Trocknung gemessen. Das KVH der Steher und Schwellen hatte vor der Trocknung ebenfalls 14 %, und danach nur mehr 11 %, da das KVH in keinem Kontakt zum feuchten Lehm stand.

Die Lehmoberfläche machte einen trockenen und ausgehärteten Eindruck. Die Messung mit einem

handelsüblichen elektronischen Estrichmessgerät zeigte, dass die Gleichgewichtsfeuchte von ca 3 % noch nicht erreicht war. Durch eine Probenöffnung an der Rückseite der Schalung wird die innere Schicht von Lehm1200 auf ihren Trocknungsgrad untersucht. Es hat sich gezeigt, dass dort der Lehm noch bröselig und feucht war, d.h. eine komplette Durchtrocknung des Lehmelements mit einer Stärke von 12 cm benötigt eine längere Zeit in der Trockenkammer.



7.2.4. WENDEN DES MUSTERELEMENTS

Stellt die mangelnde Endtrocknung speziell an der Innenseite, wo das Lehmelement an der Stakenkonstruktion hängt, ein mechanisches Problem für das Wenden des Elements dar?
 Wird sich das Lehmelement ganz oder teilweise lösen, wenn es über Kopf nach unten hängt?
 Es zeigte sich, dass eine komplette Durchtrocknung nicht nötig ist. . Das Lehmelement Lehm1200 hat



nach dem Wenden keinerlei Ausbeulungen oder Risse aufgewiesen.

Das spart Zeit und Energie in der Trockenkammer, denn das Element Lehm1200 kann durch den zweiten Trocknungsvorgang mit dem äußeren Element Lehm300 weiter getrocknet werden, obwohl es noch nicht ausgetrocknet ist und für die weitere Fertigung und dann in der Trockenkammer nach unten hängend liegt!

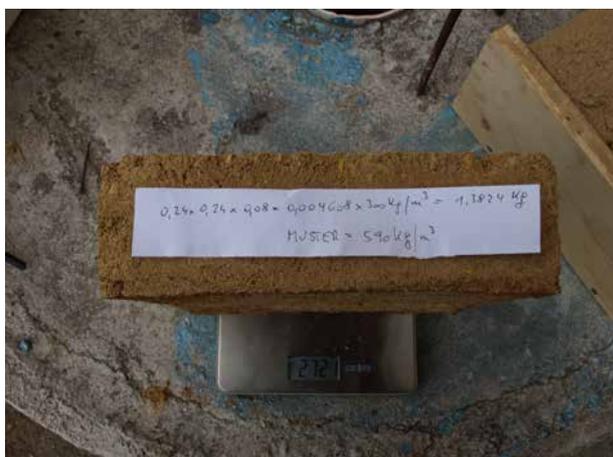
7.2.5. EINLEGEN DER HOLZFASERDÄMMUNG

Nach dem Wenden liegt die äußere Schicht des Wandelements nach oben. Zwischen die Ständerkonstruktion wird eine Holzweichfaserdämmung – SteicoFlex 14 cm – eingelegt. Die Stärke der inneren Holzschicht ist neben der Statik vor allem abhängig von den Anforderungen an den Wärmeschutz. Für die Herstellung der Holz-Lehm-Verbundelemente hat das keinen Einfluss und ist bis zu Passivhausansprüchen erweiterbar.



7.2.6. LEHM300 – ÄUßERES LEHMELEMENT

Die Abmagerung von Lehm300 mit Holzspänen hat trotz mehrfacher Vorversuche das Raumgewicht von 300 kg/m^3 immer überschritten. Offensichtlich ist es nicht möglich mit der spezifischen Raumdichte von Holz und Lehm die Mischung entsprechend abzumagern. In den Versuchen sind Werte um die 600 kg/m^3 problemlos erzielbar, ein Wert von 450 kg/m^3 dagegen erst nach mehreren Versuchen. Es kann also eine Spanne von $450 - 600 \text{ kg/m}^3$ als praktisch machbar angenommen werden.



Lehm300 hat im Musterelement 450 kg/m^3 . Nach dem Aufbringen der Stakenleisten wird die Lehmmischung aufgebracht, gerüttelt und dann abgezogen.

7.2.7. TROCKNEN VON LEHM300 IN DER TROCKENKAMMER

Anschließend wird das gesamte Element wieder liegend in die Trockenkammer gebracht. Trockendauer wieder 120 Stunden. Die Gleichgewichtsfeuchte des Lehms ist dann erreicht und die Lehmbauteile sind ausgetrocknet.

Das gesamte Musterelement wird anschließend stehend in der Halle des Holzbaubetriebes noch einen Monat gelagert und beobachtet. Es zeigen sich dabei keinerlei äußerliche oder optische Veränderungen. Die Gleichgewichtsfeuchte ändert sich nach Ablauf des Monats im Kommbereich und sinkt unter 3 %.

7.2.8. TRANSPORT

Der Transport und die Montage dienen der Überprüfung, ob die Verbindung zwischen Holz und Lehm elastisch genug ist, um Erschütterungen und Bewegungen aufnehmen zu können. Das Element wird verpackt und auf einem Sattelschlepper am vorderen Teil des Sattels befestigt. Hernach wird der LKW wie geplant geladen. Das heisst das Lehmelement fährt den ganzen Tag bei einem normalen Holzbaustransport und dessen Montage mit, um eine möglichst große Belastung für das Musterelement zu erhalten.



Weiters wurde für den Transport ein regnerischer Tag ausgesucht, um den Einfluss von Feuchtigkeit und eventuell eintretendem Wasser überprüfen zu können. Am Ende des Tages wurde das Element von Pernitz - südlich von Wien - nach Retzbach an der tschechischen Grenze transportiert. Bahnübergänge und ähnliche Strassenunebenheiten wurden ohne Vorsicht überfahren.

Das Musterelement hat den Transport absolut schadlos überstanden. Die elastische Befestigung um die Staken bewirkt, daß Bewegungen und Erschütterungen im Bauteil aufgenommen werden können, ohne daß sich Teile der Lehmelemente lösen, ausbeulen oder springen.

Feuchtigkeit spielt keine Rolle. Dort wo die Folie absichtlich beschädigt wurde und Regenwasser eintreten konnte, sind leichte Abplattungen ersichtlich, die aber lokal beschränkt auf die Stelle des Wassereintrittes sind.

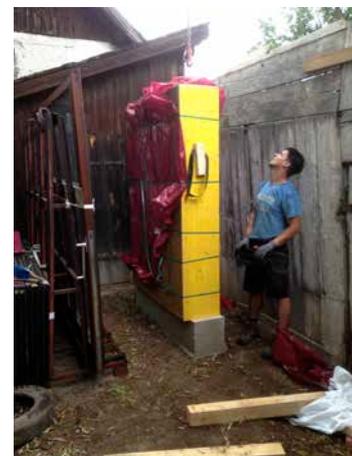
Es kann aber festgehalten werden, daß lokale Abplattungen erstens leicht ergänzt werden können, und diese in geringem Umfang die Qualität und die Funktion des Elementes nicht beeinträchtigen

7.2.9. MONTAGE

Auch bei der Montage wurde der Kran relativ rücksichtslos bedient, und das Element absichtlich starken Schwankungen und Schwingungen unterworfen. Zusätzlich wurde ein abruptes Abbremsen des herunterfahrenden Kranes simuliert. Das Element hat trotzdem äußerlich keinerlei Schäden aufzuweisen. Mehrmaliges Wenden des Elementes wurde simuliert, d.h. oben und unten wurden beliebig vertauscht, das Einbringen in 90 Grad verdrehter Form - also die Wandanschlußseite nach oben - wurde ebenfalls überprüft. Das Element wurde letztlich auf ein vorgefertigtes Fundament mit einem einseitigen Überhang für die spätere Sockeldämmung montiert; d.h. die äußere Lehmschale Lehm300 hängt an der Konstruktion frei, und steht nicht auf dem Fundament auf!

Vor der Montage wurde die untere Schutzschalung entfernt. Das bedeutet, daß die inneren und äußeren Lehmelemente frei hängend an der Holzkonstruktion verblieben sind. Auch hier wurden wieder starke Bewegungen im Kran simuliert. Das Entfernen der unteren Platte hat keinerlei Auswirkungen gezeigt. Es bestätigt sich die Annahme, daß die Lehmelemente mit der Konstruktion fest verbunden sind, und nicht auf der unteren Platte aufstehen.

Wie beim vorgefertigten Holzrahmenbau üblich, werden die Elemente vom Kran millimetergenau versetzt. Auch hier gab es keine Einschränkungen.



7.2.10. BEOBACHTUNG

Das Musterelement ist aussen und innen roh, d.h. es wurden keine Putzoberflächen oder sonstige Schutzüberzüge aufgebracht. Um das Element vor rinnendem Wasser zu schützen, wurde ein Schutzdach errichtet. Seitlich ist es offen, und das Element dadurch Nieselegen, Nebel, Frost und Feuchtigkeit ausgesetzt. Beobachtet wird ausschließlich, ob und wie sich die Lehmelemente verändern oder durch die Witterung beeinflusst werden. Im Beobachtungszeitraum von nunmehr genau einem Jahr - also alle vier Jahreszeiten – haben sich äußerlich keinerlei Veränderungen gezeigt. Einzig dort, wo durch einen Schaden im Dach Wassereintritt direkt auf die Lehmoberfläche zustande gekommen ist, sind Abplattungen und Spuren von rinnendem Wasser zu sehen. Diese weisen eine Tiefe von 0,5 bis 2 cm auf. Es gibt einen signifikanten Unterschied zwischen dem leichten Lehm300 und dem schweren Lehm1200. Bei Lehm300 passieren Auswaschungen schneller und tiefer als beim dichten Lehm. In der Praxis wird das Holz-Lehm-Verbundelement aber rinnendem Wasser nicht ausgesetzt sein, da aussen eine Putzoberfläche oder eine hinterlüftete Holzfassade die Lehmoberfläche schützen wird.



Abbildung 33: Musterwand Detail Aufbau. © Andreas Breuss.

7.2.11. ZUSAMMENFASSUNG

Das Musterelement diente vor allem der Überprüfung, ob die mechanische Befestigung der Lehmelemente an der Holzkonstruktion fest ist, und ob sie Bewegungen, die durch das Hantieren entstehen, aufnehmen kann, ohne dass Risse, Abblätterungen oder Ausbeulungen entstehen.

Sowohl in der Herstellung, als auch beim Transport und der Montage konnte das bestätigt werden. Es gibt keinerlei Anzeichen von mechanischen Schwächen im Befestigungssystem der Staken.

Auch die liegende Einbringung von Lehm macht in der Herstellung keinerlei Probleme. Im Gegenteil konnte überraschenderweise festgestellt werden, daß das massive Lehmelement1200 gar nicht komplett durchgetrocknet sein muß, um es wenden und auf dem Kopf stehend in der Trockenkammer lagern zu können.

Der Praxistest der mechanischen Tauglichkeit des Holz-Lehm-Verbundelements liegt also vor.

Auch die Beobachtung des Elements im Freien – nur geschützt vor Regen – zeigt, daß Frost, Nebel und Feuchtigkeit dem Verbundelement im Laufe eines ganzen Jahres mechanisch betrachtet keinen Schaden zufügen konnten, bzw. dieses nicht veränderten.



Abbildung 34: Musterwand Detail Aufbau. © Andreas Breuss.

8. OPTIMIERUNG DES HOLZ-LEHM-VERBUNDELEMENTS

Bei der Herstellung der Musterwand hat sich ergeben, daß eine Raumdichte von 300 kg/m^3 mit Holz und Lehm nicht zu erzielen ist. Die Rohdichte des äußeren Lehmelements Lehm300 muss daher auf machbare 450 kg/m^3 erhöht werden. Dieses Element wird daher im folgenden Lehm450 genannt. Bei einem Vergleich des Wärmeschutzes ergibt sich eine geringfügige Verschlechterung des U Wertes von $0,25$ auf $0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$. Referenz ist die im Musterelement verwendete Dämmstärke von 14 cm im Kern.

	Dicke [m]	Bezeichnung	Fl.gew. [kg/m ²]	Ra.gew. [kg/m ³]	Lambda [W/m K]	μ -	sd [m]	R-Wert [m ² *K/W]	Saniert
<input checked="" type="checkbox"/>	1)	1. 0,080 Leichtlehm 450	36,0	450	0,130	5,0	0,40	0,615	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>		2. 0,140 Holzsteher dzw. Holzfaserdämmung	-	-	Ø 0,055	-	-	Ø 2,536	<input type="checkbox"/>
	1)	2a. 40 % STEICO Flex	2,5	45	0,039	1,0	0,14	-	
	1)	2b. 40 % STEICO Flex	2,5	45	0,039	1,0	0,14	-	
	1)	2c. 20 % Vollholzbalken Fichte GH 12	16,8	600	0,120	50,0	7,00	-	
<input checked="" type="checkbox"/>	1)	3. 0,025 Schalung Fichte GH 12	15,0	600	0,120	50,0	1,25	0,208	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	1)	4. 0,120 Leichtlehm 1200	144,0	1.200	0,470	5,0	0,60	0,255	<input type="checkbox"/>
		0,365		216,8				-	

$$R_T\text{-Wert} : (R_T' + R_T'') / 2 = \mathbf{3,908 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

$$\mathbf{U\text{-Wert} : 0,26 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Abbildung 35: U Wert Berechnung mit Lehm450.

In einem weiteren Schritt soll untersucht werden, wie sich der Dämmwert des Holz-Lehm-Verbundelements verbessern läßt. Da die innere und äußere Lehmschicht unveränderliche Größen darstellen, und wenig Einfluß auf die Qualität der Wärmedämmung haben, ist die Variabilität in der Kerndämmung zu finden. Es gibt im Wesentlichen zwei Ansätze : erstens kann man die Kerndämmung erhöhen und das äußere Lehmelement direkt auf die Holzständerkonstruktion anbringen, oder man kann zweitens die Holzständerkonstruktion nochmals überdämmen, falls Wärmebrücken an der Holzkonstruktion sichtbar würden. Eine entsprechende Überprüfung mit 3 bzw. 5 cm Überdämmung hat keinen Unterschied ergeben. Am Übergang Holzkonstruktion zu Lehm450 aussen sind keine problematischen Wärmebrücken erkennbar.

Auf eine zusätzliche Überdämmung mit kreuzweise verlegten Holzstaffeln und extra zu verlegender Holzfaserdämmung wird deshalb verzichtet. Die Dämmqualität wird in der Kernzone gesteuert. Diese ist auch davon abhängig, wie hoch der Anteil der Holzkonstruktion ist. In der nachfolgenden Tabelle wird deshalb zwischen einem 10 prozentigen sowie einem 20 prozentigen Holzanteil unterschieden. Der Anteil an Holz steigert sich mit den statischen Anforderungen. Für die weitere Beurteilung und Berechnung wird daher vom schlechteren Fall mit 20 % Holzanteil in der Dämmzone ausgegangen.

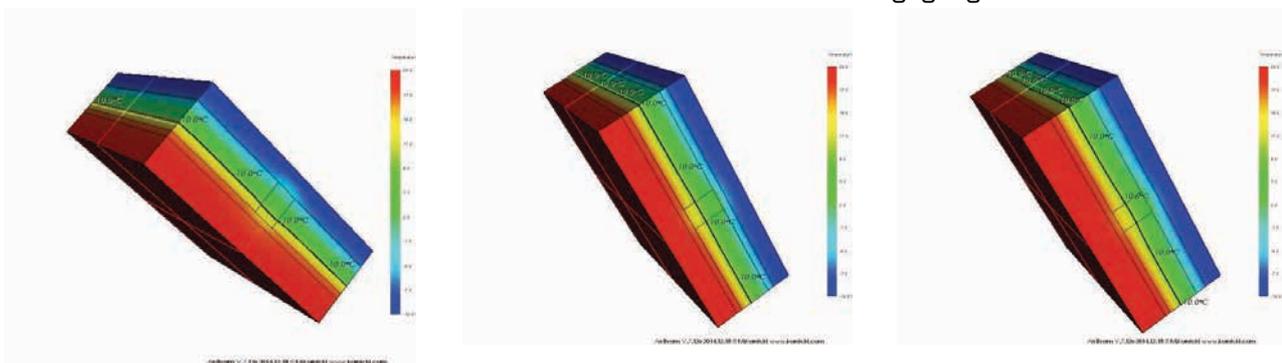


Abbildung 36: Grafik Wärmebrückenberechnung: 1–ohne Überdämmung; 2–mit 3cm Überdämmung; 3–mit 5 cm Überdämmung

Dämmstärke		U Wert			
		10 % Holzanteil		20 % Holzanteil	
14	[cm]	0,24	[W/(m ² *K)]	0,27	[W/(m ² *K)]
16	[cm]	0,22	[W/(m ² *K)]	0,24	[W/(m ² *K)]
18	[cm]	0,20	[W/(m ² *K)]	0,22	[W/(m ² *K)]
20	[cm]	0,18	[W/(m ² *K)]	0,21	[W/(m ² *K)]
22	[cm]	0,17	[W/(m ² *K)]	0,19	[W/(m ² *K)]
24	[cm]	0,16	[W/(m ² *K)]	0,18	[W/(m ² *K)]
26	[cm]	0,15	[W/(m ² *K)]	0,17	[W/(m ² *K)]

Tab. 10: U Wert abhängig von der Dämmstärke und vom Holzanteil im Kern

Es lassen sich mit dem Holz-Lehm-Verbundelement Anforderungen von Niedrigenergie- bis Passivhausstandard realisieren, ohne daß das Grundwesen des Elements verändert werden muß. Auch der stoffliche Aufbau – reduziert auf Holz, Lehm, Flachs – bleibt gleich.

Eine weitere Optimierung ist hinsichtlich der Wärmespeichermasse möglich. Die nachfolgende Tabelle zeigt, daß sich ab einer Elementstärke von 8-10 cm die speicherwirksame Masse bei zunehmender Stärke wieder verringert. (s. Kap 6.5.2.) Grund hierfür dürfte die gute Speicherkapazität von Holzfaserdämmstoffen sein, die mit zunehmender Entfernung vom Lehmelement weniger wirksam wird (s. Kap 6.5.2.).

Elementstärke Lehm1200 plus 2 cm Lehmputz		Speicherwirksame Masse	
4 + 2	[cm]	99,45	[kg/m ²]
6 + 2	[cm]	107,39	[kg/m ²]
8 + 2	[cm]	110,21	[kg/m ²]
10 + 2	[cm]	109,66	[kg/m ²]
12 + 2	[cm]	107,61	[kg/m ²]
14 + 2	[cm]	105,34	[kg/m ²]
16 + 2	[cm]	103,46	[kg/m ²]

Tab. 11: Abhängigkeit Elementstärke und speicherwirksame Masse

Die Dicke des Lehm1200 Elements wird bei gleichem Raumgewicht (1200 kg/m³) auf 10 cm reduziert. Das spart einerseits Gewicht, reduziert aber vor allem die Herstellungskosten durch einen geringeren Lehm- und Holzverbrauch in der Schalung.

Die äußere Lehmschicht Lehm450 ist – wie oben erwähnt – für den gesamten Wärmedämmwert nicht von entscheidender Bedeutung. Lediglich bei der Überdämmung der Holzkonstruktion spielt sie für die Vermeidung von Wärmebrücken eine entscheidende Rolle. Eine Reduktion der äußeren Schichtstärke von 8 auf 6 cm würde den Gesamt U –Wert bei 14 cm Kerndämmung von 0,26 auf 0,27 W/m²K verschlechtern. Im Vergleich dazu würde eine Vergrößerung der inneren Kerndämmung von 2 cm eine Verbesserung des U-Wertes bereits auf 0,24 W/m²K bewirken.

Das Standardmodul hat sich nach der Herstellung der Musterwand auf folgenden Aufbau verändert:

Lehm450 [Raumbgewicht 300 kg/m ³] – Außen	6 cm
Holzständerkonstruktion mit Holzfaserdämmung	14 cm
aussteifende Holzdiagonalschalung	2,4 cm
Lehm1200 (Raumbgewicht 1200 kg/m ³) - Innen	10 cm
GESAMTWANDSTÄRKE	32,4 cm

In der nachfolgenden Tabelle werden U – Werte herkömmlicher Bauteile mit dem Holz-Lehm-Verbundsystem in Abhängigkeit der Wandstärke verglichen. Dabei zeigt sich, daß das Holz-Lehm-Verbundelement sehr gut vergleichbar ist. In Bezug auf Hochlochziegel schneidet es sogar besser ab. Dort ist allerdings Mineralwolle als Dämmmaterial berechnet. Das gilt auch für den Massivholzbau, der mit sehr dünnen Wandstärken gute U-Werte erreicht. Allerdings ist dort die speicherwirksame Masse viel niedriger. Das Lehm Passivhaussystem in Tattendorf hat mit Strohdämmung und OSB Platten zwar Passivhausstandard - das aber auf Kosten von sehr großen Wandstärken. Das System wird nur in dieser Form angeboten.

		U Wert								
		Wandstärke								
Bauelement	Wandstärke	32 cm	34 cm	36 cm	38 cm	40 cm	42 cm	44 cm	50 cm	55 cm
Holz Lehm Verbundelement		0,27	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,15	
Hochlochziegel Porotherm					0,27				0,18	
Hochlochziegel Porotherm mit integrierter WD - MW					0,21			0,17	0,15	
Holz100 Thoma ohne WDVS			0,21							
Holz100 Thoma mit WDVS								0,15		
Massivholz KLH 3S plus WDVS - MW		0,17					0,12			
Lehm Passivhaus Tattendorf										0,12
STB Wand 18 cm plus WDVS EPS		0,27	0,23	0,21	0,19	0,18	0,16	0,15	0,13	

Quellen: Fa Wienerberger, Fa KLH, Fa. Lopas, baubook

Tab. 12: Abhängigkeit Wandstärke und U - Werte

Das Holz-Lehm-Verbundsystem ist sehr flexibel, was die bauphysikalischen und statischen Anforderungen betrifft. Die Wandstärken können, je nach Wunsch, beliebig variiert werden. Das Grundkonzept – Reduzierung der Materialien auf Holz, Lehm und Flachs – bleibt immer erhalten. Der Einsatz von künstlichen Baustoffen kann gänzlich vermieden werden. Das System hat - im Vergleich zu anderen - konkurrenzfähige Dämmwerte, aber deutlich bessere Wärmespeichereigenschaften, die der Behaglichkeit der NutzerInnen zugute kommt. Die dicke Lehmschicht im Innenraum reguliert zudem in mehrfacher Weise das Raumklima.

9. PROTOTYPISCHE ANWENDUNG DES HOLZ-LEHM-VERBUNDELEMENTES FÜR EIN REIHENHAUS

Nachdem in Kap. 6 die Leit- und Anschlussdetails des neuen Systems dargelegt wurden, wird hier die Frage erörtert, ob dieses den Beweis antreten kann, auch den Anforderungen einer konkreten Bauaufgabe architektonisch und bautechnisch gerecht zu werden? Dies soll an Hand eines fiktiven Reihenhauses knapp und exemplarisch untersucht werden. Der Fokus liegt auf der architektonischen und baulichen Umsetzung des Holz-Lehm-Verbundsystems. Die Erwartung an das neue Bausystem ist, dass im verdichteten Flachbau keine Einschränkungen im architektonischen Entwurf zu erwarten sind. Mit Flachbau werden Gebäude mit zwei Geschossen und zusätzlich - optional - einem ausgebauten Dachraum verstanden. In diesem Rahmen ist das Holz-Lehm-Verbundsystem statisch überprüft und ohne weitere Auflagen so anwendbar.

9.1. BESCHREIBUNG DES REIHENHAUSENTWURFS

Traditionell wurden in Strassen- und Angerdörfern im niederösterreichischen Weinviertel auf langgezogenen, schmalen Grundstücken Streck- oder Hakenhöfe errichtet, deren Grundrisse durch eine Abfolge von straßenseitigen Wohnräumen, einer anschließenden unbelichteten Küche mit Vorraum und durch Wirtschaftsräume im Hoftrakt gekennzeichnet sind. Am Ende eines Innenhofes steht üblicherweise quergestellt eine durch fahrbare Scheune, die den Weg in den Hintaus freigibt, der landwirtschaftlich



Abbildung 37: Bebauungsstruktur eines typischen Weinviertler Dorfes (schwarz) mit dem Entwurf einer neuen Reihenhaussiedlung (rot)

genutzt wurde. Diese Strukturen sind ursprünglich aus agrartechnischen Gründen entstanden, bieten heute aber eine interessante Abfolge von privaten, intimen und halb- bzw. öffentlichen Räumen. Der Reihenhauskomplex (rot unterlegt) transformiert diese alte Dorfstruktur (schwarz unterlegt) zu neuen „Gartenhofhäusern“. Die Bauweise entlang der Strasse ist geschlossen. Von dort aus wird ein fußläufiger Zugang bzw. eine Vorfahrt gebildet, während die Garage oder der Carport „hinten hinaus“ angesiedelt sind. Von „hinten“ erfolgte auch traditionellerweise die Zufahrt mit landwirtschaftlichen Maschinen. Der Vorteil bei dieser Planung ist, dass die Strasse von parkenden Autos frei gehalten und die Zonen vor den Häusern als Begegnungszonen verwendet werden könnten.

Hinter der straßenseitigen Verbauung ergeben sich private Höfe, die in diesem Fall zwischen zwei Gebäuden angeordnet sind, während sich dahinter ein langgestreckter halböffentlicher Bereich ergibt. Die Nutzung der Gebäude ist sowohl beim straßenseitigen als auch beim hofseitigen Haus frei gestaltbar. Es gibt keine oder nur wenige Innenwände, die statisch relevant sind. Das Ziel ist eine größtmögliche Freiheit in der Grundrissgestaltung, sodass nicht nur Räume in den Gebäuden frei einteilbar, sondern die Gebäude selbst auch variabel nutzbar sind. Es steht dem Nutzer zum Beispiel frei nur das straßenseitige Wohnhaus zu nutzen und das Hofhaus zu vermieten, um dort Ferienwohnungen anzubieten oder es zum Beispiel als Mehrgenerationenhaus zu nutzen.

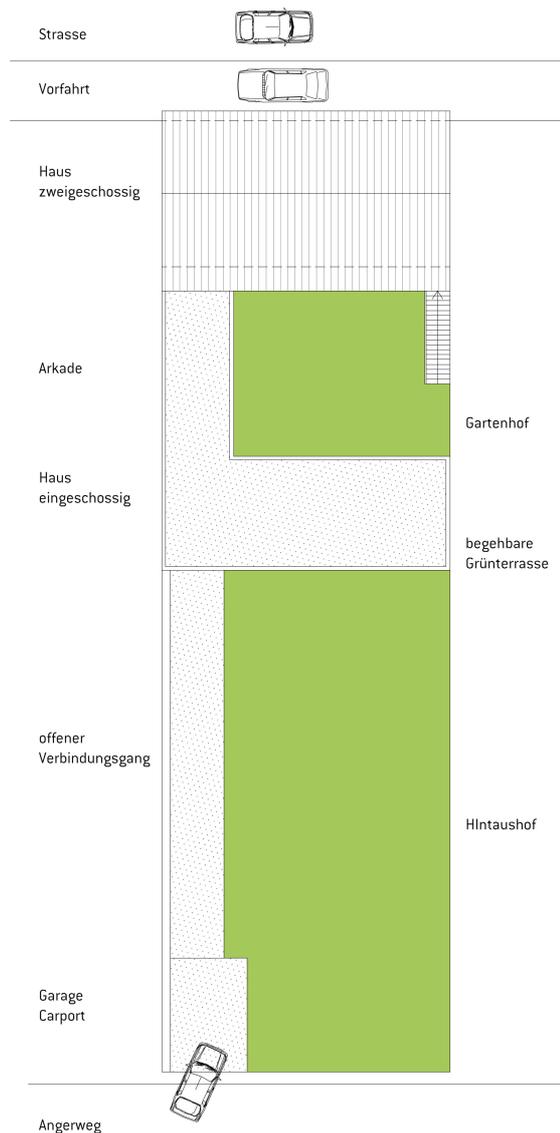


Abbildung 38: Entwurf eines Gartenhofgebäudes als Reihenhaus konzipiert.

Umgekehrt kann, wenn der Familienbedarf geringer wird, das größere Gebäude den Kindern mit ihren Familien übergeben, oder an junge Familien vermietet, und stattdessen das kleinere Hofhaus bezogen werden. Da es vom Hofhaus beidseitig Gärten gibt, lassen sich sehr leicht gut verträgliche - bei Wunsch auch trennbare - Zonen innerhalb der Hofstruktur bilden.

Der Grundriss ist in jedem Geschoss frei gestaltbar, indem entweder eine Reihe von Zimmern angeordnet oder ein großer offener Wohnraum geschaffen werden kann. Es steht dem Nutzer also völlig frei, wo und wie viele Schlaf- und Wohngeschosse angeordnet werden.

9.2. BESCHREIBUNG DES GARTENHOFHAUSES ALS GRUNDMODUL FÜR DEN REIHENHAUSKOMPLEX

Das Gebäude wird mit vorgefertigten Modulen errichtet. Diese sind keine unveränderbaren Systemmodule, sondern je nach Bauaufgabe individuell herstellbar. In diesem Fall bewegen sich die geschosshohen Grundmodule zwischen 1,3 m und 2,1 m Breite. Um die Spannweite der Deckenelemente zu verringern, werden tragende Zwischenwände vor einer Lager- und Sanitärzone errichtet.

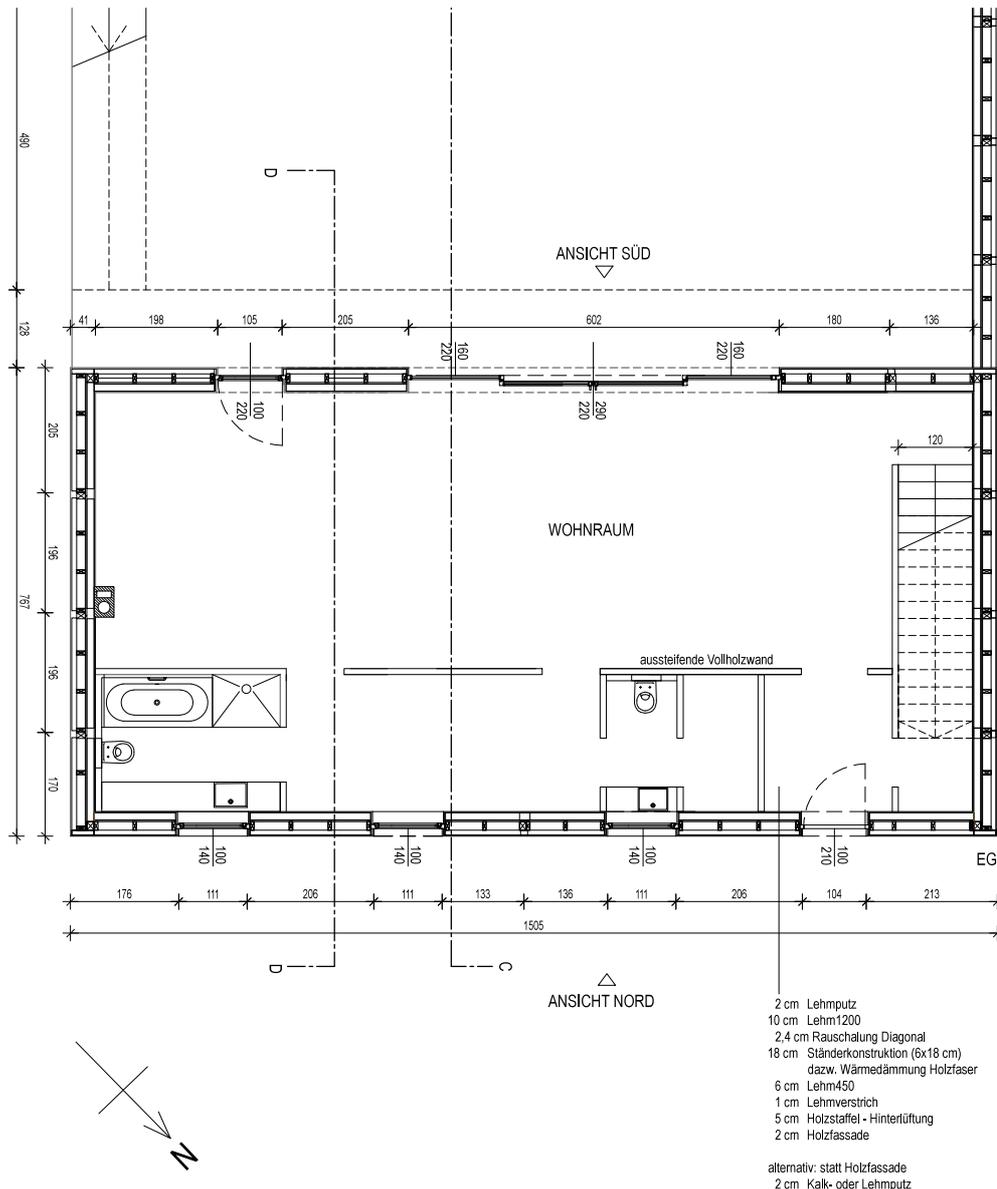


Abbildung 39 : Grundriss Erdgeschoss: Gartenhofgebäude als Reihenhaus

Diese dienen zusätzlich noch der horizontalen Aussteifung des Gebäudes. Stürze werden als eigene, vorgefertigte Elemente zwischen den Grundmodulen eingehängt. Wahlweise sind selbstverständlich auch sturzlose bzw. raumhohe Fenster- und Türelemente möglich.

Im Schnitt zeigen sich die Grundmodule jeweils geschosshoch, und nehmen die Decken direkt auf.

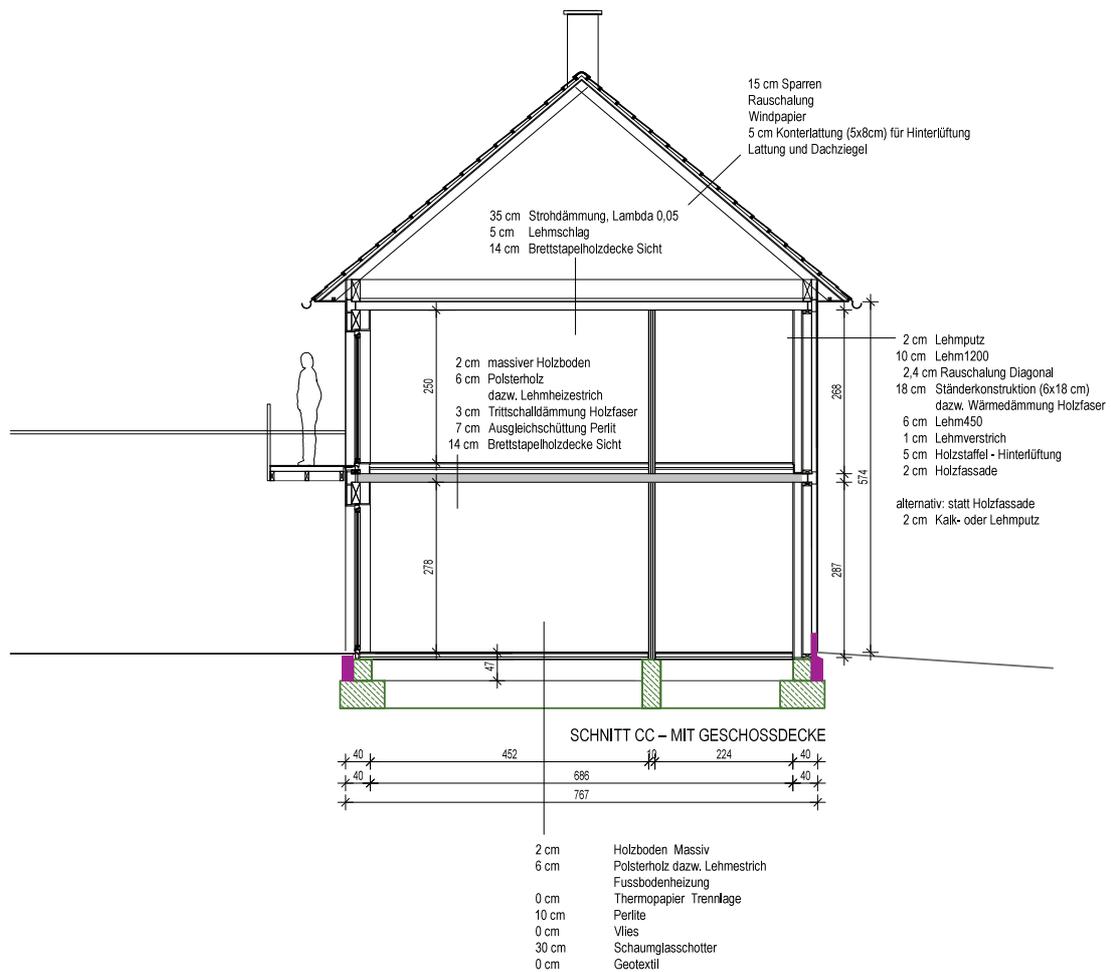


Abbildung 40 : Schnitt: Gartenhofgebäude als Reihenhaus.

9.3. GRUNDMODUL DES GARTENHOFHAUSES

Das Grundmodul des Gartenhofhauses hat folgenden Aufbau(von außen nach innen):

<i>Kalkputz</i>	<i>2 cm</i>
Oder wahlweise	5 cm Hinterlüftung mit einer 2 cm Holzschalung
Lehmverstrich	1 cm
Lehm450	6 cm
Holzkonstruktion	18 cm
dazw. Holzfaser WD	18 cm
Lehm1200	10 cm
<i>Lehmputz</i>	<i>2 cm</i>

Der U – Wert dieser Außenwand beträgt $0,22 \text{ W/m}^2$.

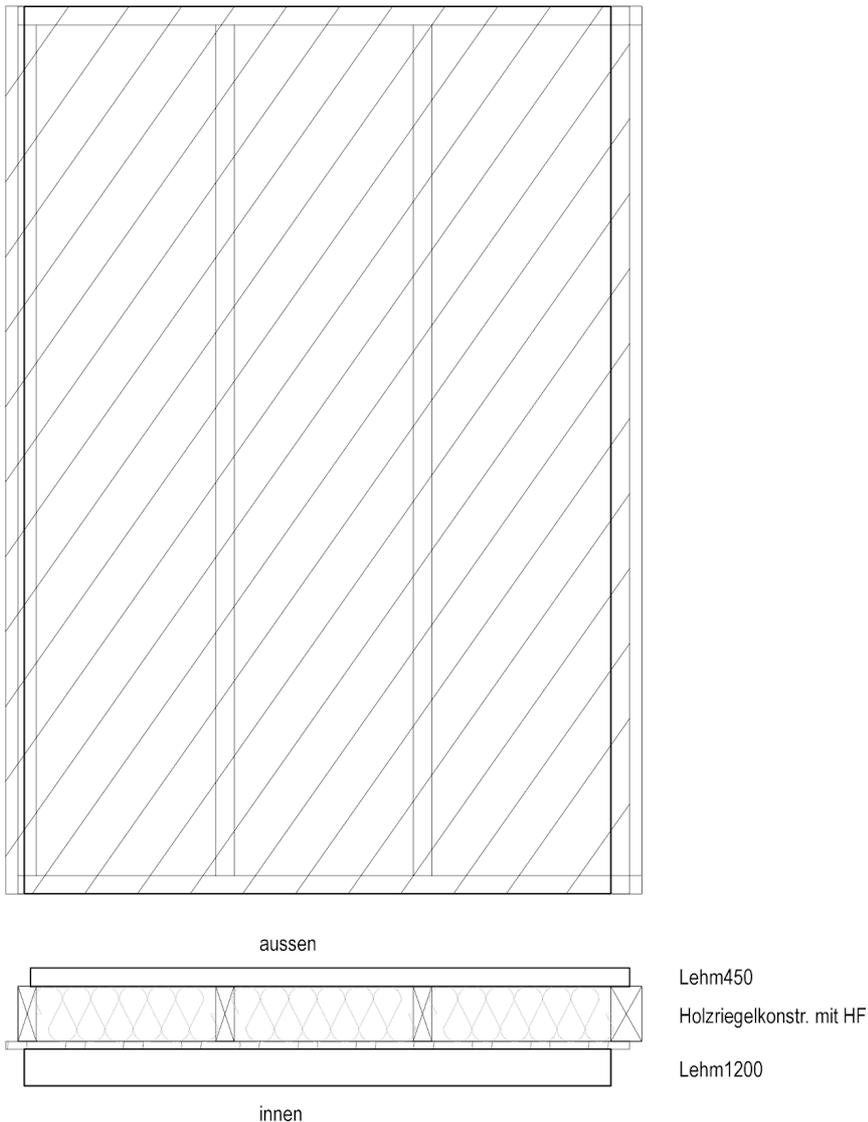


Abbildung 41: Einzelmodul in der Ansicht oben und im Grundriss unten.

Die nachfolgende Abbildung 42 zeigt, wie systemisch nach dem Entfernen der Schutzschalungen die Grundmodule aneinander gereiht werden. Im Aufriss sieht man die freien Bereiche an den Elementstößen, in die später Schlusselemente mit der gleichen Lehmkonsistenz eingesetzt werden. Der Anschluss der Decke und des nächsten Geschosses sind äquivalent - wie im Holzrahmenbau üblich - ausgeführt (siehe Schnitt Abb.42 links). Lediglich die Herstellung der luftdichten Ebene ist mit einem geschlämmten Flachsvlies ausgeführt. (s. Kap. 6.7.6., Abb. 29). Die horizontale Aussteifung wird mit der Diagonalschalung erzielt, die an den Stößen entsprechend überlappt montiert wird (s. Kap. 6.3.)

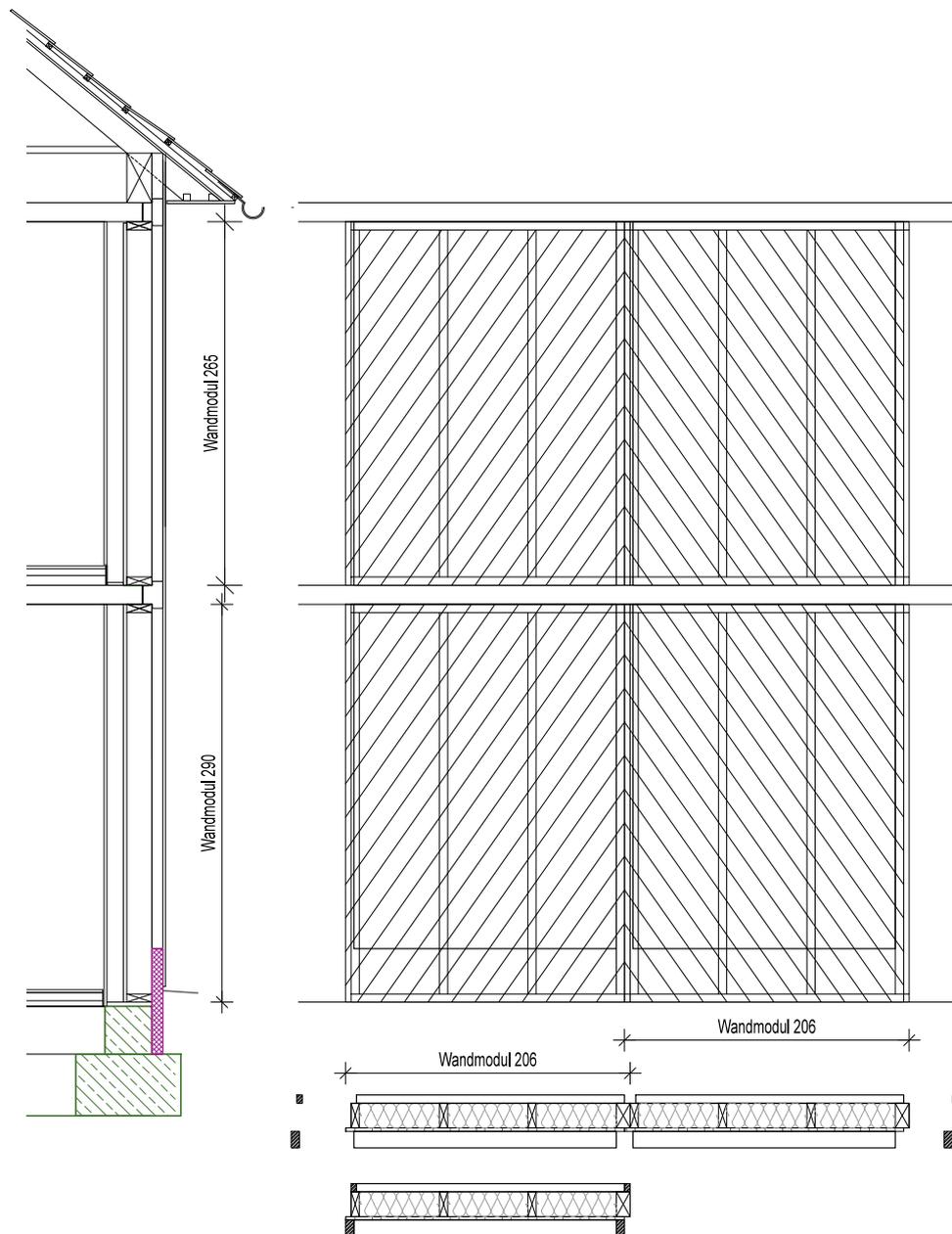


Abbildung 42: Systemskizze der zusammengesetzten Einzelmodule. Schnitt links. Ansicht oben. Aufriss unten.

9.4. Montage

Die geschosshohen Wandelemente mit maximal 250 cm Breite haben ein Gewicht von 200 kg/m^2 . An den seitlichen Holzstehern werden Befestigungslaschen für den Krantransport angebracht. Die Holz-Lehm-Verbundelemente können mit einem herkömmlichen LKW Kran - wie ihn Holzbaubetriebe nutzen – montiert werden. Seitlich sind für den Transport Sicherungen angebracht, die auch als Schalung für den Lehm dienen. Vor dem Versetzen werden diese abgebaut (siehe Abb. 42 unten und Kap. 6.7.1., wo der genaue Montageablauf dargestellt wurde).

Es sind für die Montage keine Sondertransporte oder Schwerlastkräne nötig.

Transportmittel	Transportmaße				Beschreibung	Kostenkalkulation
Straße	max. Abmessungen für Fahrzeug mit Transportgut					
ohne Genehmigung	Länge 12 m bis 18,25 m	Breite 2,55 m	Höhe 4,00 m	Gewicht 40 t	Ladevolumen: 2,50 m × 2,60 m × 12,00 m	abhängig von Genehmigungserfordernis und Begleitvorschriften
mit Genehmigung	25 m	3,5 m	4,2 m	60 t	bis Breite 3 m kein Begleitfahrzeug	
Sondertransporte	Abmessungen über 3,50 m oder Höhe 4,20 m				Genehmigung für gewählte Strecke u. Begleitvorschriften	

Abbildung 43: Übersicht der Transportmöglichkeiten auf der Strasse

Durch die Ausbildung einer stabilen Scheibe je Element wird ein Verziehen der Rahmen bei der Montage verhindert.

Die Montagezeit ist mit jener der herkömmlichen Holzrahmenbauweise zu vergleichen.

Die Wandelemente werden in der richtigen Montagereihenfolge angeliefert und mit einem Kran auf das glattgestrichene Mörtelbett des Streifenfundamentes versetzt. Ausgerichtet werden sie an einem Stahlwinkel (BMF Winkel) der bereits montiert die Wandflucht vorgibt und immer in den Elementstößen positioniert ist. Bevor das nächste Element hinzugefügt wird, muss das bereits versetzte gegen Kippen gesichert werden. Das folgende Element wird von außen an die überstehende Diagonalschalung des letzten bzw. an den gleichen Stahlwinkel geschoben, ausgerichtet und verschraubt, während gleichzeitig die Diagonalschalung als aussteifende Ebene kraftschlüssig mit dem benachbarten Element verklammert wird (s. Kap. 8. Bild 6, S. 74).

Nach Montage der Wandelemente werden die Brettstapeldecken aufgesetzt und mit Lehmschlämme abgedichtet.

Sind die Deckenelemente versetzt wird in gleicher Weise das nächste Geschoss aufgebaut.

9.5. FUSSBODENAUFBAU

Um die Reduktion auf die drei natürlichen Baustoffe – Holz, Lehm und Flachs - im ganzen Gebäude nachweisen zu können, müssen demzufolge auch die Fußbodenaufbauten diesem Prinzip entsprechen. Gleichzeitig soll aber auf die Speichermasse der schweren Bodenschichten nicht verzichtet werden. Weiters braucht man für die Fußbodenheizung eine leitende Masse, die normalerweise mit einem Zementestrich erzielt wird. Dieser Zementestrich wird gegen einen neu entwickelten Lehmeestrich getauscht. Funktionen wie Trittschallschutz, Heizestrich und Unterkonstruktion für den Holzboden müssen von diesem erfüllt werden. Der neue Estrich ist ein Hybrid zwischen einem massiven Estrich- und einem Trockenestrichaufbau. Zwischen eine Polsterholzkonstruktion wird der Lehmeestrich gefüllt, der die Fußbodenheizung aufnimmt. Der Holzboden selbst wird nicht verklebt, sondern mit der Polsterholzkonstruktion verschraubt. Um den nötigen Trittschallschutz zu erreichen, muss die gesamte Lehmeestrichmasse auf die Trittschalldämmung drücken; d.h. die Polsterholzkonstruktion muss so ausgeführt sein, dass keine punktuellen Lasten der Holzstaffeln auf die Trittschalldämmung gibt.

Die Lehmischung selber muss so beschaffen sein, dass ein minimales Schwindmaß zu erwarten ist. An zwei prototypischen Projekten ist dieser Estrich schon in der Praxis erprobt worden. Es handelt sich dabei um einen Dachgeschossausbau in Wien, sowie ein Familienhaus in Niederösterreich. In beiden Fällen hat der Praxistest - im ersten Fall drei Jahre und im zweiten Fall zwei Jahre – gezeigt, dass die geforderten bauphysikalischen Anforderungen erfüllt werden können. Um den Nachweis zu bestätigen, bzw. um eine Standardisierung zu erzielen, wäre eine Versuchsanordnung in einer technischen Prüfanstalt nötig. Der Vorteil liegt vor allem darin, dass der Holzboden nicht verklebt werden muss. Die übliche Verlegung eines Heizstriches sieht eine Verklebung mit einem PU Kleber vor, der aber Immissionen im Rauminnen bewirkt. Es ist zudem nicht erwiesen, dass der Bodenkleber und die Verklebung eines Mehrschichtparkettes nicht negativ interagieren. Es wird in der Regel nur gemessen, ob ein einzelnes Bauprodukt gesundheitsschädlich ist, nicht aber ob eine mögliche Wechselwirkung von chemischen Stoffen vorliegt.

Ein weiterer Vorteil ist die Vermeidung von zementgebundenen Baustoffen, was die Ökobilanz des Gebäudes stark verbessert.

Der Fußbodenaufbau mit Lehmestrich und Holzboden ist diffusionsoffen, d.h. Feuchtigkeit im Boden kann in den Raum abgegeben werden und von den Lehmwänden positiv für das Raumklima genutzt werden. Nachteil ist, dass der Lehmestrich auf die Verlegung von Holzböden, oder auf Böden mit einer Unterlagsplatte beschränkt bleibt: also zum Beispiel massive Dielen- oder Parkettböden sowie elastische und textile Beläge auf Verlegeplatten. Man verliert hier - im Falle von Linoleum zum Beispiel - allerdings den Vorteil der Diffusionsoffenheit.

Fliesen und Steinböden, sowie Spachtelungen wurden nicht in Betracht gezogen oder untersucht. Es ist zu erwarten, dass der Lehmestrich nicht die nötige Zugfestigkeit für Stein- oder Steingutböden erreichen kann.

9.6. GESCHOSSDECKE

Für die oberste Geschossdecke stehen zwei Aufbauten zur Wahl - beide kommen mit ausschließlich natürlichen Baustoffen aus.

Die erste Variante sieht als Dämmung Stroh vor. Im Zuge einer Detailerhebung seitens GRAT (GRAT. Renew Building. 2012) zum Thema Strohbau wurde eine Datenbank zu unterschiedlichen Leitdetails erstellt. Die für ein Lehmhaus in Mitterretzbach vom Autor geplante Decke zum Dachraum ist Teil dieser Datenbank (s. Abb. 44). Die Strohdämmung mit einem Raumgewicht von ca. 100 – 120 kg / m³ liegt auf einem Lehmbett,

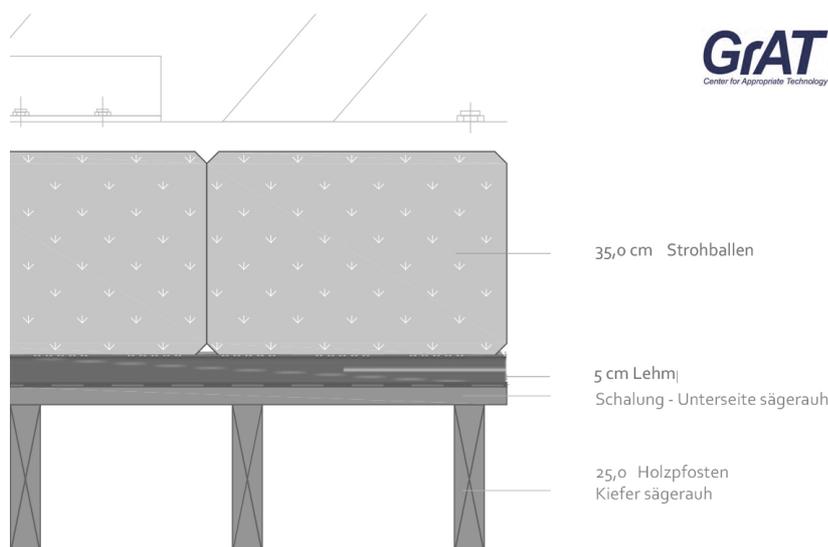


Abbildung 44: Dämmung oberste Geschossdecke. Detail Andi Breuss. Datenbank. GRAT. Renew Building. 2012.

das als Brandschutzschicht eingeführt werden muss, wenn darunter eine Sichtholzdecke bleiben soll. Die Lehmschicht dient auch als Dampfbremse. Die verdichteten Strohballen können oben offen liegen, oder einen zusätzlichen Lehmschlag bzw. einen begehbaren Holzrost erhalten.

Der Aufbau für Variante Stroh (von außen nach innen)

35 cm	Strohballen
5 cm	Lehmschlag
14 cm	Brettstapelholzdecke verdübelt

Die zweite Variante behält das Materialprinzip Holz und Lehm bei. Statt der Strohdämmung werden begehbare Holzfaserdämmplatten aufgelegt. Diese Platten – zum Beispiel Fa Steico Top – sind gepresste Holzfasern ohne Bindemittel.

Auf eine Dampfbremse kann hier auch verzichtet werden, da die Holzfaserdämmplatten laut Hersteller luftdicht sind.

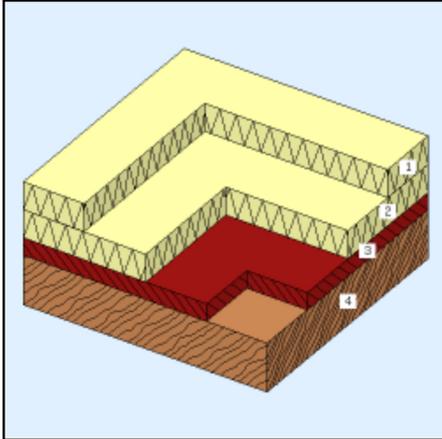
Der Aufbau Variante Holzfaser (von außen nach innen)

16 cm	Holzfaserdämmung (2 x Steico TOP)
oder	
(24 cm	Holzfaserdämmung (3 x Steico TOP))
5 cm	Lehmschlag
14 cm	Brettstapelholzdecke verdübelt

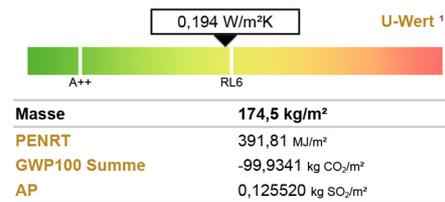
Abbildung 45 zeigt einen Vergleich der U-Werte zwischen Strohdämmung und Holzfaser. Die Strohdämmung hat im Vergleich zur Holzfaserdämmung in Bezug auf die Dämmstärke keinen Vorteil. Eine Reduzierung der Holzfaserdämmung auf 16 oder 24 cm bringt aber deutliche Einbußen im U-Wert. Wirtschaftlich betrachtet wird die Strohdämmung besser abschneiden. Da Stroh auch ein rein natürlicher Baustoff mit einem extrem geringen PEI Inhalt ist, bietet diese eine brauchbare Alternative für die oberste Geschossdecke.

Decke Holzdämmung

Decke, Dach: Flach- oder Schrägdach gegen Außenluft - nicht hinterlüftet - Wärmestrom nach oben

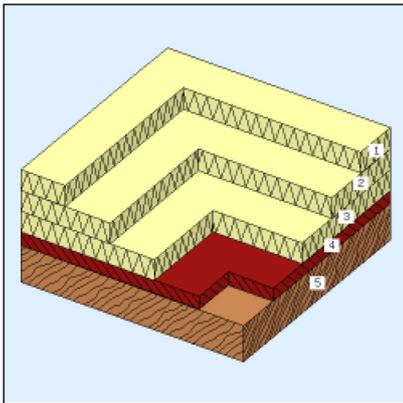


Nr.	Typ	Schicht	d cm	λ W/mK	R m ² K/W	Δ OI3 Pkt/m ²
1		Holzfaser WF-W (50 kg/m ³)	8,000	0,042	1,905	4
2		Holzfaser WF-W (50 kg/m ³)	8,000	0,042	1,905	4
3		Lehm - Massivlehm 2000 kg/m ³	5,000	1,000	0,050	3
4		DD DiagonalDübelholz	14,000	0,120	1,167	3
					$R_{si} / R_{se} =$	0,100 / 0,040
					R' / R'' (max. relativer Fehler: 0,0%) =	5,166 / 5,166
Bauteil			35,000		5,166	13

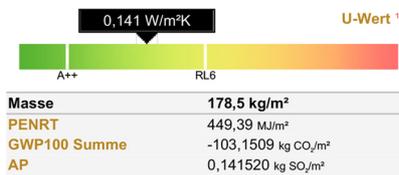


Decke Holzdämmung 3x

Decke, Dach: Flach- oder Schrägdach gegen Außenluft - nicht hinterlüftet - Wärmestrom nach oben

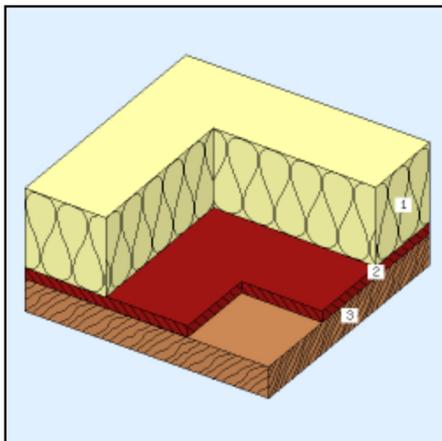


Nr.	Typ	Schicht	d cm	λ W/mK	R m ² K/W	Δ OI3 Pkt/m ²
1		Holzfaser WF-W (50 kg/m ³)	8,000	0,042	1,905	4
2		Holzfaser WF-W (50 kg/m ³)	8,000	0,042	1,905	4
3		Holzfaser WF-W (50 kg/m ³)	8,000	0,042	1,905	4
4		Lehm - Massivlehm 2000 kg/m ³	5,000	1,000	0,050	3
5		DD DiagonalDübelholz	14,000	0,120	1,167	3
					$R_{si} / R_{se} =$	0,100 / 0,040
					R' / R'' (max. relativer Fehler: 0,0%) =	7,071 / 7,071
Bauteil			43,000		7,071	17



Decke Strohdämmung

Decke, Dach: Flach- oder Schrägdach gegen Außenluft - nicht hinterlüftet - Wärmestrom nach oben



Nr.	Typ	Schicht	d cm	λ W/mK	R m ² K/W	Δ OI3 Pkt/m ²
1		Baustrohballen (109 kg/m ³)	35,000	0,051	6,863	-3
2		Lehm - Massivlehm 2000 kg/m ³	5,000	1,000	0,050	3
3		DD DiagonalDübelholz	14,000	0,120	1,167	3
					$R_{si} / R_{se} =$	0,100 / 0,040
					R' / R'' (max. relativer Fehler: 0,0%) =	8,219 / 8,219
Bauteil			54,000		8,219	4

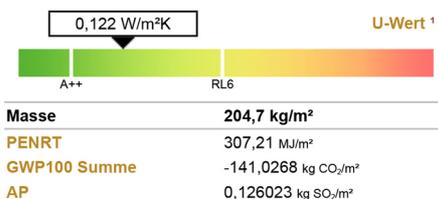


Abbildung 45: Vergleich der U Werte zwischen Holzfaser- und Strohdämmung auf der obersten Geschosdecke.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Wenn keine Quelle angegeben ist, stammt die Abbildung aus dem Archiv des Autors.

- Abb. 1 verfügbar unter http://www.weilburg-lahn.info/sehwert/pihain_1.htm.pdf (2014-05-20)
- Abb. 2 verfügbar unter: <http://www.malerblatt.de/themen/trockenbau-innenraum/tief-durchatmen/#slider-intro-2> (2014-05-20)
- Abb. 3 Firma Wienerberger. www.wienerberger.de
- Abb. 4 verfügbar unter: <https://www.zollverein.de/angebote/sanaa-gebaeude-events-mit-ein-und-ausblicken> (2016-08-20)
- Abb. 5 [VOLHARD, s. Lit., S. 83 Abb 94.]
- Abb. 6 [MEINGAST, s. Lit, 2005]
- Abb. 7 [PYTLIK, s. Lit., 2008]
- Abb. 8 [TEIBINGER, 2011]
- Abb. 9 [ALware, 2016]
- Abb. 10 [MINKE, 2004, S. 25]
- Abb. 11 [POPPER, 2005, S. 100]
- Abb. 12 [VOLHARD, 2013, S. 203]
- Abb. 13 [TEIBINGER, 2011]
- Abb. 14 [VOLHARD, 2013, S. 226]
- Abb. 15 [KOLB, 2010, s. Lit]
- Abb. 16 [KOLB, 2010, s. Lit]
- Abb. 17 [skizziert und berechnet von DI Pock im Zuge eines überholz Seminars, Juni 2013]
- Abb. 18 [Holz-Lehm-Verbundelement von Andreas Breuss]
- Abb. 19 [VOLHARD, 2013, S. 203]
- Abb. 20 Berechnung TB DI Walter Leiler, Wien
- Abb. 21 [vgl. VOLHARD, 2013, S. 238]
- Abb. 22 [Holz-Lehm-Verbundelement von Andreas Breuss]
- Abb. 23 [Holz-Lehm-Verbundelement von Andreas Breuss]
- Abb. 24 [Holz-Lehm-Verbundelement von Andreas Breuss]
- Abb. 25 [Holz-Lehm-Verbundelement von Andreas Breuss]
- Abb. 26 [Holz-Lehm-Verbundelement von Andreas Breuss]
- Abb. 27 [Holz-Lehm-Verbundelement von Andreas Breuss]
- Abb. 28 [Holz-Lehm-Verbundelement von Andreas Breuss]
- Abb. 29 [Holz-Lehm-Verbundelement von Andreas Breuss]
- Abb. 30 [Holz-Lehm-Verbundelement von Andreas Breuss]
- Abb. 31 [VOLHARD, 2013, S.125]
- Abb. 32 [Holz-Lehm-Verbundelement von Andreas Breuss]
- Abb. 33 Musterwand von Andreas Breuss.
- Abb. 34 Musterwand von Andreas Breuss.
- Abb. 35 Berechnung TB DI Walter Leiler, Wien
- Abb. 36 Berechnung TB DI Walter Leiler, Wien
- Abb. 37 [BREUSS, 2016]
- Abb. 38 [BREUSS, 2016]
- Abb. 39 [BREUSS, 2016]
- Abb. 30 [BREUSS, 2016]
- Abb. 41 [BREUSS, 2016]
- Abb. 42 [BREUSS, 2016]
- Abb. 43 [HOLZBAUATLAS, S. 74]
- Abb. 44 [BREUSS, 2012]
- Abb. 45 [baubook, 2016]

TABELLENVERZEICHNIS

- Tab 01 Kostenvergleich von Stampflehmwänden zu herkömmlichen Wänden
- Tab 02 BRANDVER-HALTEN von Lehmbaustoffen
- Tab 03 WIND-DICHTIGKEIT und LUFT-DICHTIGKEIT
- Tab 04 Verhältnis von U – Werten zu Raumgewicht und Schichtstärke (Kap 6.5.1)
- Tab 05 Speichermassenberechnung des gesamten Bauteiles ohne und mit Putz. (s. Tab. 5 fett) (Kap 6.5.1)
- Tab 06 Vergleich der wirksamen Speichermasse bei solitärer Betrachtung des inneren Elements Lehm1200 ohne Wandaufbau (Kap 6.5.1)
- Tab 07 Vergleich der wirksamen Speichermasse durch Veränderung der äußeren Lehmschicht. (Kap 6.5.1)
- Tab 08 Wandaufbau des Holz-Lehm-Verbundelementes (Kap 6.5.1)
- Tab 09 Vergleich der Speichermassen von unterschiedlichen Bausystemen. (Kap 6.7.2.)
- Tab. 10: U Wert abhängig von der Dämmstärke und vom Holzanteil im Kern (Kap 8)
- Tab. 11: Abhängigkeit Elementstärke und speicherwirksame Masse. (Kap 8)
- Tab. 12: Abhängigkeit Wandstärke und U - Werte. (Kap 8)

LITERATURVERZEICHNIS

ALware; <http://www.alware.de>

AMT der NÖ Landesregierung (Hrsg.) (2008): *Lehm und Ziegel. Denkmalpflege in Niederösterreich*. Band 39. St. Pölten: Amt der NÖ Landesregierung.

AS-TERRE, CRATERRE, ECOLOGIK (2013): Broschüre *Festival Architecture de Terres* in Grains d'Isere, Frankreich

CASA LI, Firma: *Fertigteile aus Holz und Lehm*. Verfügbar unter: <http://www.casa-li.de/fertigteile.html> (Stand 2013-06-13)

CLAYTEC, Firma: *Lehmbaumaterialien: Unübertroffen in ihrer Anwendungsbreite*. Verfügbar unter:

<http://www.claytec.be/de/bauherren/lehmbaumaterialien/#anwendung1> (Stand 2013-07-04)

CLAYTEC: *Unternehmensgeschichte*. Verfügbar unter: <http://www.claytec.de/unternehmen/unternehmensgeschichte.html> (Stand 2013-07-04)

CLAYTEC, Firma: *Lehmbauplatte*. Verfügbar unter: http://www.claytec.de/fileadmin/user_upload/pdf_techniken/5-2_lehmbauplatte.pdf (Stand 2013-07-22)

DBZ 12/89, Seite 1639 f f. *Auswirkungen einer Fugenundichtigkeit*. Verfügbar unter:

http://www.naturbauhof.de/lad_daemm_dicht_luft.php

DACHVERBAND Lehm e.V. (Hrsg.); VOLHARD Franz & RÖHLEN, Ulrich (2009): *Lehmbau Regeln. Begriffe, Baustoffe, Bauteile*. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

DATAHOLZ (2013): *Bauteilkatalog*. Verfügbar unter: <http://www.dataholz.at/cgi-bin/WebObjects/dataholz.woa/wa/bauteil?klasse=Aussenwand&language=de> (Stand 2013-07-04)

DATAHOLZ (2013): *Baustoffe*. Verfügbar unter: <http://www.dataholz.at/cgi-bin/WebObjects/dataholz.woa/wa/baustoff?baustoff=OSB&language=de> (Stand 2013-07-04)

FERK, Heinz, REITERER, E. M. (2002). *Luftdurchlässigkeitsprüfung ohne Rillen der Holz100-Wand*. Technische Universität Graz. Prüfbericht Fa Thoma. B02.858.001.100

GAUZIN-MÜLLER, Domimique (2004): *Neue Wohnhäuser aus Holz*. Basel. Birkhäuser Verlag.

GUTTMANN, Eva & SCHÖBER, Klaus Peter (2010): *Fassaden aus Holz*. Wien: pro:Holz Austria.

HOLZBAU WEGSCHEIDER (2013): *Ökomassivplatte und Ökomassivelement*. Verfügbar unter: <http://www.holzbauelemente.at> (Stand 2013-07-02)

IBN. Institut für Baubiologie + Ökologie. *Baubiologie in Frage und Antwort*. Verfügbar unter:

<http://www.baubiologie.de/site/fragenundantworten/2910iso.php>

INSITUT für INTERNATIONALE ARCHITEKTUR DOKUMENTATION (Hrsg.) 2003: *Holzbauelemente Atlas*. 4. Auflage. Basel: Birkhäuser Verlag.

- KEPPLER, Marliese & LEMCKE, Tomas (1986): *Mit Lehm gebaut*. Ein Lehmhaus im Selbstbau. München: Blok Verlag.
- KOLB, Josef (2010): *Holzbau mit System*. Tragkonstruktion und Schichtaufbau der Bauteile. 3. Aufl. Basel: Birkhäuser Verlag.
- KRÄFTNER, Johann & SCHACHEL Roland (1977): *Baugesinnung in Niederösterreich. Ansätze zur Dorferneuerung*. Ein Bilder-Lese-Buch für die Praxis. Wien: Amt der Niederösterreichischen Landesregierung.
- KÜNZEL Helmut (1998): *Zweischaliges Mauerwerk mit oder ohne Hinterlüftung*.. Sonderdruck aus wksb 43. Jhg. Heft 42, Seiet 9-14. Fraunhoferinstitut.
- MEINGAST Roland (2005): *Lehm- Passiv Bürohaus Tattendorf*. Berichte aus Energie- und Umweltforschung. 29/2005.
- MILLER, T. ; GRIGUTSCH, E. & SCHULZE, K.W. (1947): *Lehmhaufibel*. Darstellung der reinen Lehmbauweisen mit 55 Abbildungen. Unveränderter Nachdruck der 2. Auflage, Weimar: Verlag der Bauhaus-Universität Weimar.
- MINKE, Gernot & MAHLKE, Friedemann (2004): *der Strohhallenbau*. Ein Konstruktionshandbuch. Staufen bei Freiburg: ökobuch-Verlag.
- MINKE, Gernot & MAHLKE, Friedemann (2009): *Handbuch Strohhallenbau*. Grundlagen, Konstruktionen, Beispiele. Staufen bei Freiburg: ökobuch-Verlag.
- MINKE, Gernot (2004): *das neue Lehmbau Handbuch*. Baustoffkunde, Konstruktionen, Lehmarchitektur. 6. Auflg.. Staufen bei Freiburg: ökobuch-Verlag.
- MINKE, Gernot (2009): *Handbuch Lehmbau*. Baustoffkunde, Techniken, Lehmarchitektur. 7. Auflg.. Staufen bei Freiburg: ökobuch-Verlag.
- MÜLLER, Nicolas & HARNISCH, Jochen (2008): *How to Turn Around the Trend of Cement Related Emissions in the Developing World*. A report prepared for the WWF – Lafarge Conservation Partnership. Nürnberg: Ecofys Germany.
- NATURE PLUS. Internationaler Verein für zukunftsfähiger Bauen und Wohnen. *Abschlussbericht*. Neckargmünd. 2009.
- PARTOLL, Martin (2007): *Verfahren zur Herstellung eines Fertigteils Wandelementes*. IN: Europäisches Patentamt. Patentnummer: EP 1 826 330 A 2
- PAULI, Peter; MOLDAN, Dietrich (2003): *Reduzierung hochfrequenter Strahlung im Bauwesen – Baustoffe und Abschirmmaterialien*. München, Universität der Bundeswehr
- PFEIFER, Günter & BRAUNECK, Per (2008): *Hofhäuser*. Eine Wohnbautypologie. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag.
- PILZ, Achim (Hrsg.) (2012): *Lehm im Innenraum*. Gestaltung, Bauphysik, Konstruktion. 2. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

- POPPER, Rudolf; NIEMZ, Peter & EBERLE, Gerhild (2005): *Untersuchungen zu Diffusionswiderstand von Holzwerkstoffen*. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. Vol. 156 (2005), S. 100 - 103.
- PYTLIK, Leon (2008): *Wandelement in Skelettbauweise*. IN: Deutsches Patentamt. Patentnr. DE 199 51 231 B4
- RÖHLEN, Ulrich & ZIEGERT, Christof (2010): *Lehmbau-Praxis*. Planung und Ausführung. Berlin: Bauwerk Verlag.
- RUDOLFSKY, Bernhard (1987): *Sparta /Sybaris. Keine neue Bauweise, eine neue Lebensweise tut not*. Salzburg, Residenz Verlag.
- SCHNEIDER, Ulrich; SCHWIMANN, Mathias & BRUCKNER, Heinrich (1996): *Lehmbau für Architekten und Ingenieure*. Konstruktion, Baustoffe und Bauverfahren, Prüfungen und Normen, Rechenwerte. Düsseldorf: Werner-Verlag.
- SCHÖNBURG, Kurt (2008): *Lehmbauarbeiten*. Aktualität der herkömmlichen Lehmbauarbeiten. Wirtschaftliche und technische Vorteile. Lehm und Lehmstoffe. Neubau und Sanierung von Lehmbauten. Lehm-Gestaltungsarbeiten. Schäden an Lehmbauten. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag.
- SCHROEDER, Horst (2010): *Lehmbau*. Mit Lehm ökologisch planen und bauen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- SCHWANER, Kurt (Hrsg.) (2009): *ZUKUNFT HOLZ Querschnittsbericht und Entwicklungspotenziale*. Biberach. Hochschule Biberach. Institut für Holzbau.
- TEIBINGER, Martin (2006): *Feuchteschutz- Grundlagen*. Holzforschung Austria. Wien. Verfügbar unter: <http://www.iti.tuwien.ac.at/dlfiles?param=ZmlsZWFKbWluL0lUSS1Eb3dubG9hZC9XYWhsZmFjaC8yNTQwMzUvRmV1Y2h0ZXNjaHV0ei5wZGY=>.
- TEIBINGER, Martin (2012): *Brandschutzvorschriften in Österreich. Anforderungen nach OIB-Richtlinie 2*. In: att.Zuschnitt Attachement - Sonderthemen im Bereich Holz, Holzwerkstoff und Holzbau. 2. Veränderte Auflage 2012. Wien: pro:Holz Austria.
- TEIBINGER, Martin (2011): *Brandverhalten von Holz- und Holzwerkstoffen Anforderungen – Entwicklungen*. Holzforschung Austria. Wien. Broschüre.
- THOMA, Erwin (2012): CD_Thoma / Architekten_CD / Bauphysik.
- THOMA, Erwin (2006): *Architektenmappe*.
- TOMM, Arwed (2000): *Ökologisch planen und bauen*. Das Handbuch für Architekten, Ingenieure, Bauherren, Studenten, Baufirmen, Behörden, Stadtplaner, Politiker. 3. Aufl. Braunschweig/ Wiesbaden: Vieweg Verlag.
- TROJAN, Martin (2008): *LehmBausteine für tragende Wände*. Auswirkungen durch Beimischen von Zusatzstoffen auf die Druckfestigkeit von LehmBaustoffen. Saarbrücken: VDM-Verlag Dr. Müller.
- VOLHARD, Franz (2013): *Bauen mit Leichtlehm*. Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm. 7. Aufl. Wien: SpringerWienNewYork-Verlag.

WEISGRAM, Wolfgang (2012): *4 Dringliche Anfragen zu Wald, Luft, Holz und Klima*. In: *proHolz Edition 11*. Wien: pro:Holz Austria.

WINTER, Wolfgang; SCHÖBERL, Helmut & BEDNAR Thomas (2005): *Holzbauweisen im verdichteten Wohnungsbau*. Konstruktion, Bauphysik, Kosten. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

WURM, Andreas (2016): *Sommerliche Überwärmung Ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Bauweisen und Nutzerverhalten*. Diplomarbeit eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für Architektur und Raumplanung